

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Studium povrchové změny styčné plochy brzdového
kotouče.**

Study of Surface, Changes of Contact Surface Brake
Wheel

Student:

Bc. Jiří Verlík

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Verlík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: Studium povrchové změny styčné plochy brzdového kotouče
Study of Surface Changes of Contact Surface Brake Wheel

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte vlastnosti materiálu pro výrobu brzdového kotouče.
2. Prostudujte vlastnosti povrchu brzdového kotouče a jeho změny v procesu zatížení.
3. Navrhněte metodiku experimentálních prací.
4. Proved'te experimentální práce a zpracujte technickou zprávu.

Seznam doporučené odborné literatury:

FREMUNT, P., PODRÁBSKÝ, T.: *Konstrukční oceli*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, Brno, 1996. 261 s. ISBN 80-85867-95-8

MOHYLA, M.: *Technologie povrchových úprav kovů*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 2006. 3. vydání. 156 s. ISBN 80-248-1217-7.

BROCK, T., GROTEKLAES, M., MISCHKE, P.: *European Coating Handbook*. Vincentz Verlag, Hannover, Germany, 2000. 410 s. ISBN 3-87870-559-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

PODĚKOVÁNÍ

Těmito pár větami chci poděkovat lidem, kteří mi pomáhali a plně mě podporovali. Nejdříve chci poděkovat Ing. Marku Gebauerovi, který mi dal možnost spolupracovat na projektu GCS a mohl jsem z něj čerpat cenné informace. Dále chci poděkovat mé ženě Kateřině, která mi pomáhala při psaní a úpravách textu Diplomové práce. Chci také poděkovat doc. Ing. Jitce Podjuklové, CSc. za trpělivost a morální podporu. Za důsledné vedení mé práce chci poděkovat slečně Ing. Daniele Pavelkové, za poskytování cenných rad. Velké díky patří pánům Ing. Zdenku Štorkánovi za vynikající práci v oboru metalografie a doc. Ing. Petru Mohylovi Ph.D. za podporu při projektu GCS.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jitky Podjuklové, CSc. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě, dne15.5.2016.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB - TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě, dne15.5.2016.....

....

Bc. Jiří Verlík

Jiří Verlík

Malenovice 99

739 11 Frýdlant nad Ostravicí

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VERLÍK, J. Studium povrchové změny styčné plochy brzdového kotouče: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2016, 82 s., vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Diplomová práce se zabývá studiem povrchové změny styčné plochy vzduchem chlazeného brzdového kotouče před a po jeho úpravě. Kotouč bez úpravy má hlavní proud chladného vzduchu přiveden potrubím do středu kotouče a dále prochází přes radiální kanálky a jako ohřátý vzduch je vyfoukáván do prostoru. Brzdový kotouč s úpravou GCS (G-Cooling Systém) zlepšuje chlazení, které spočívá ve dvojím průchodu vzduchu přes navrtané tělo brzdového kotouče.

Úprava brzdového kotouče je primárně navrhována pro závodní stroje formule jedna. Tato úprava je využitelná i v jiných závodních speciálech, například: Nascar, Le Man, S2000 a jiné. Další využití je možné v automobilech vyšší třídy. Toto zdokonalené chlazení brzdových kotoučů je zamýšleno i v odvětvích jako je kamionová doprava, železniční doprava a taktéž v letectví.

Teoretická část práce se zabývá vlastnostmi materiálů pro výrobu brzdových kotoučů. V experimentální části práce jsou uvedeny výsledky testů brzdového kotouče. Na základě vyhodnocení výsledků testů se prokázalo, že úprava GCS, je velice přínosná v oblasti povrchové a materiálové stability styčných ploch brzdového kotouče.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

VERLÍK, J. Study of Surface, Changes of Contact Surface Brake Wheel. Ostrava: Technical University of Ostrava. Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2016, 82 s., Advisor diploma thesis: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

The thesis deals with the study of surface changes the contact surface air cooled brake disc before and after the treatment. A disc without any treatment has a main flow of cool air fed via line into the center of the disc and passes through the radial passages and the heated air is blown into the space. The brake disc with adjusting GCS (G-Cooling system) improves the cooling, which is double the passage of air through the body drilled brake disc.

Adjusting the brake disc, it is primarily designed for racing machines Formula One. This adjustment is useful in other race cars, for example: Nascar, Le Man, S2000 and others. Further use is possible in the higher class car. This improvement of cooling the brake discs is also envisaged in sectors such as road transport, railway transport and also in aviation.

The theoretical part deals with the properties of materials for the manufacture of brake discs. In the experimental part the test results of the brake disc. Based on the evaluation results of the tests showed that the GCS treatment is very beneficial in terms of surface and material stability of the contact surfaces of the brake disc.

Seznam použitých značek a symbolů

Veličina	Popis	Jednotky
ABS	protiblokovací systém	
ARA	diagram nelegovaných litin s kuličkovým grafitem	
C	uhlík	
Cr	chrom	
Cu	měď	
ESP	elektronický stabilizační program	
Fe	železo	
Fe ₃ C	karbid železa	
Fe ₃ Si	silicid železa	
HNO ₃	kyselina dusičná	
Mn	mangan	
Mo	molybden	
MPa	megapascal	
Ni	nikl	
P	fosfor	
S	síra	
Si	křemík	
Sn	cín	
°C	stupně Celsia	

Obsah

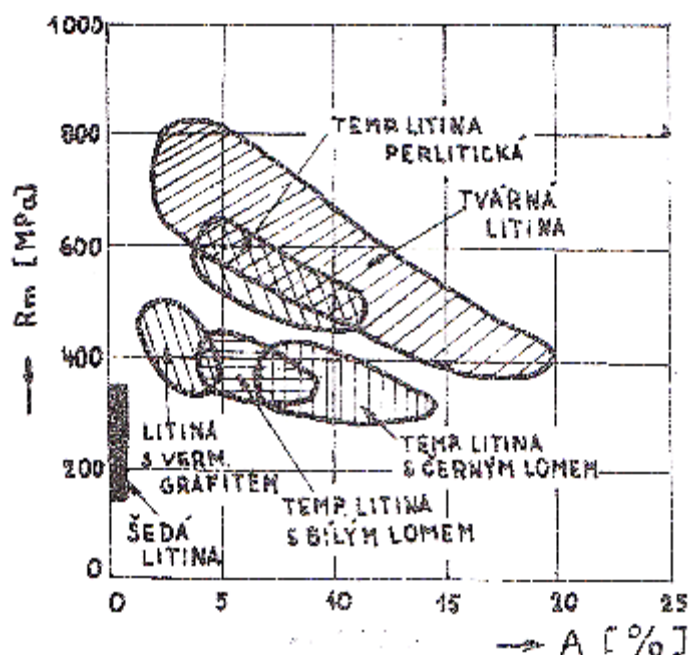
Úvod	- 10 -
1. Litiny.....	- 11 -
2. Krystalizace litin.....	- 13 -
3. Fázové přeměny litin v tuhém stavu	- 16 -
3.1 Litiny s lupínkovým grafitem ČSN EN 1561	- 17 -
3.2 Tvárná litina.....	- 18 -
3.3 Temperovaná litina	- 18 -
4. Tepelné zpracování grafitických litin.....	- 20 -
4.1 Žíhání pro snížení tvrdosti	- 20 -
5. Experimentální část.....	- 22 -
5.1 Cíl diplomové práce.....	- 22 -
5.2 Metodika experimentálních prací	- 22 -
5.3 Popis testovaných kotoučů	- 22 -
5.3.1 Kotouč č. 1. je opotřebován standardním používáním.	- 22 -
5.3.2 Kotouč č. 2. úpravou GCS je opotřebovaný standardním používáním.	- 23 -
5.3.3 Kotouč č. 3. firmy PFC Brakes je nový, nepoužitý.	- 23 -
5.4 Popis experimentálních prací.....	- 24 -
5.4.1 Makrostruktura	- 24 -
5.4.2 Mikrostruktura	- 26 -
5.4.3 Mikrostruktura pomocí otiskové světelné mikroskopie	- 27 -
5.4.4 Měření tvrdosti	- 30 -
5.4.5. Měření tvrdosti pomocí přenosného ultrazvukového tvrdoměru Krautkramer MIC 10.	- 32 -
6. Výsledky experimentálních prací	- 33 -
6.1 Kotouč použitý PFC Brakes č. 1	- 33 -
6.2 Kotouč s úpravou GCS č. 2.....	- 46 -
6.3 Kotouč nový č. 3	- 67 -
6.4 Měření tvrdosti	- 70 -
7. Závěr.....	- 74 -
8. Seznam použité literatury	- 76 -
9. Seznam příloh.....	- 77 -

Úvod

Automobilový průmysl je od začátku minulého století jedním z nejrychleji se rozvíjejících odvětví. Rozvoj automobilizmu nám ukázal možnosti zrychlení dopravy a přepravy. Obrovská úspora času i zvýšené množství přepravených nákladů nám zvyšují nároky na vozový park dopravců. Vůbec se klade všeobecný důraz na kvalitu vyrobených automobilů. Ať už jsou to nákladní a osobní automobily, vede to ke zdokonalení všech odvětví v tomto průmyslu a stále se hledají možnosti, jak určité části automobilů vylepšovat a zdokonalovat. Zejména se jedná o snížení množství spotřeby materiálu u některých součástí automobilů. Dalším trendem je snižování nákladů na provoz automobilu zejména v kvalitě a spolehlivosti brzdového systému, které dokážou reagovat na jakýkoliv podnět k bezpečnému zastavení, nebo ovlivnit bezpečnosti jízdy. Brzdy jsou specifickou součástí automobilu. Od ESP a ABS nám pomáhají v bezpečné jízdě. Aby brzdy byly funkční a měly dostatečnou sílu k pohlcení brzděné energie, musí se používat kvalitní materiály, které odolávají brzděným podmínkám v jakékoliv situaci. V konstrukci brzdového systému jsou nejvíce namáhány brzdové kotouče a brzdové obložení. V procesu brždění dochází k třecím silám na povrchu styčných ploch brzdového kotouče a povrchu brzdového obložení, které vedou k zahřívání povrchu a následným vlivem jsou ochlazovány vnějším okolím. Důsledkem těchto procesů dochází ke změnám ve strukturách povrchových ploch brzdového kotouče. Z těchto výše uvedených poznatků vyplývá, že materiály brzdových kotoučů musejí být odolné vůči vlivům tepelného namáhání, změnám struktury materiálu a vzniku povrchových trhlin. Cílem této diplomové práce je úprava brzdových kotoučů tak, aby se omezilo, popřípadě vyloučilo praskání povrchu jeho styčných ploch.

1. Litiny

Litiny jsou slitiny železa a uhlíku, kde obsah uhlíku je cca nad 2%, obr. 1. Při tomto obsahu uhlíku je železo nekujné a je obrobitelné pouze broušením, nebo soustružením. Kromě uhlíku, tyto slitiny obsahují prvky, jako jsou Mn, Si, P, S. Obsažené prvky jsou ve vyšším množství a ty se musí přetavením ve slévárnách redukovat. Materiál používán k odlévání složitých tvarů, které by se obtížně opracovávaly anebo výroba by byla vysoce obtížná. [4]



Obr. 1: Mechanické vlastnosti grafitické litiny.

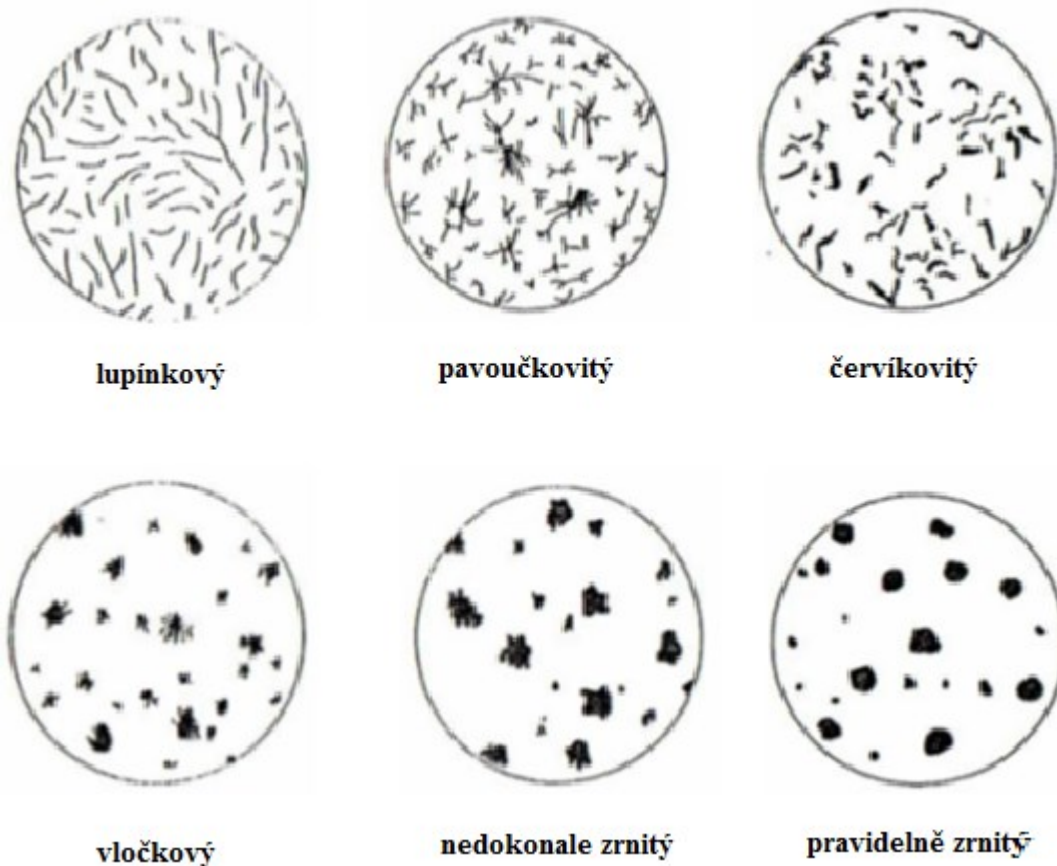
Ve slitinách, kde je obsah uhlíku větší, je rovnováha eutektika stabilní i nestabilní. Vznik grafitického, neboli cementického (ledeburit) ovlivňuje rychlosti tuhnutí a chemické složení materiálu. Struktura cementická tvořená perlitem a ledeburitem, má plochy lomu bílé. Kdežto struktura grafitická je tvořená perlitem a grafitem a má plochy lomu zbarvené do šeda. [4]

Všeobecně šedá litina je nejvhodnější k slévárenským účelům, nízkou cenou a svými vlastnostmi, zejména mechanickými. [4]

Bílé litiny- zejména tvoří perlit a cementit. Tuhnou dle metastabilní rovnováhy. Používá se převážně pro výrobu temperované litiny. Povrch lomu je bílý a díky přítomnosti cementitu je tato litina vysoce tvrdá a naopak křehká. Upotřebení těchto litin je velice malé. Používají se v případech, kde se neklade důraz na křehkost, ale je nutná velká odolnost oproti opotřebení. Například (kluzné ložiska a různé kluzné pánve). [4]

Grafitické litiny- obsahuje lupínkový grafit. U těchto litin je mnoho předností. Například jsou lehčí než ocelolitina. Vyznačuje se dobrou obrobitelností, schopností pohlcovat tření, malou citlivostí na vruby. [4]

Maková litina- obsahuje grafit a volný cementit. Skupina litin obsahující jeden nebo více legujících prvků. Jsou to například korozivzdorné a žáruvzdorné litiny. [4]



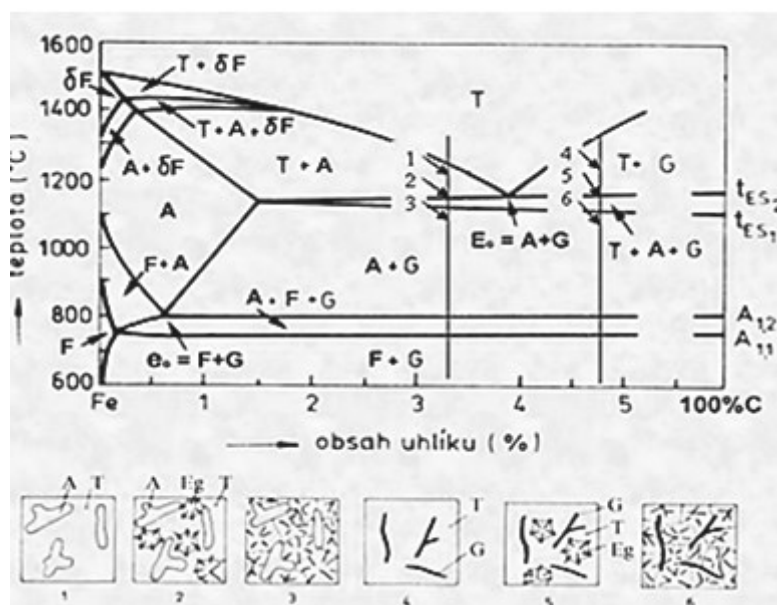
Obr. 2: Grafit v litinách

2. Krystalizace litin

V litinách je jedním z nejdůležitějších prvků křemík. Jeho množství je různé a proměnlivé v širokém rozsahu. U bílých litin, které nejsou legované a mají malé množství jiných přísad, se dá sledovat fázová přeměna v diagramu metastabilní soustavy Fe – Fe₃C. S malým množstvím křemíku nemá vliv na fázové složení litiny. U litin s vyšším obsahem uhlíku nad 2.2% a více procent se uplatňuje stabilní rovnováha soustavy Fe-C-Si. Je nutné sledovat fázové přeměny v ternárních diagramech. V níže uvedeném diagramu. [4]

V rozmezí teplot se projevuje vliv křemíku v eutektické ($t_{ES2} - t_{ES1}$) i eutektoidní přeměny ($A_{1,2} - A_{1,1}$). Tím se snižuje mezní rozpustnost uhlíku v austenitu a snižuje se množství uhlíku v eutektiku a eutektoidní přeměny k větším teplotám. Na základě rychlosti ochlazování získává litina v důsledku rekrystalizace své vlastnosti. (7)

Krystalizace, neboli chladnutí taveniny. Na základě rychlosti ochlazování získává litina v důsledku rekrystalizace své vlastnosti. Z rovnovážného diagramu vyčteme informaci o fázových přeměnách. V litinách je nejhojnějším prvkem křemík. Ten určíme sledováním ternárního diagramu Fe-C-Si z fázových přeměn. Sestavení takového diagramu je náročná práce. Z tohoto důsledku se používají pseudobinární diagramy s daným obsahem křemíku a různým obsahem železo- uhlík.



Obr. 3: Řez ternárním diagramem Fe – C – Si pro 2 % Si a průběh krystalizace a překrystalizace podeutektické šedé litiny

Na obrázku 3 je diagram Fe – C – Si s obsahem 2% Si. Vlivem působení křemíku se v diagramu vyskytují teploty T_{E1} a T_{E2} . Podobně probíhá teplotní eutektoidní přeměna v intervalech T_{a1} a T_{a2} viz. obr. 3. [4]

Přeměna v tuhý roztok začíná vylučováním dendritů austenitu v teplotních intervalech 1 – 2. V intervalech 2 – 3 tuhne ostatní tavenina, jako eutektikum. Chladnutí v teplotním intervalu 3 – 4 mezi eutektáliou a eutektoidálou, austenit ztrácí uhlík podle čáry E“ a S“. Uhlík, který je přebytečný, krystalizuje na už vyloučeném grafitu ve formě eutektického grafitu. V intervalu 4 – 5 eutektoidní austenit překrystalizuje na perlit. [4]

Pro dobrou krystalizaci má obrovský vliv chemické složení a čas chladnutí. V těchto stejných podmínkách od bílé litiny až po feritickou šedou litinu mohou mít různé struktury. Grafitizace probíhá za podpory křemíku, který umírňuje rozpouštění uhlíku v austenitu a přesouvá bod eutektoidní a eutektický vlevo. Vlivy daných prvků v daných polohách (eutektické body) se mohou vyjádřit takzvaně stupněm eutektičnosti. [4]

$$Se = \frac{C}{4.26 - 0.3 (Si + P)} \quad (2.1)$$

kde C, Si, P jsou procentuální obsah prvků v litině.

Se = 1 eutektická litina

Se < 1 podeutektická litina

Se > 1 nadeutektická litina

Mangan

vlastnosti opačné, než křemík. Stabilizuje cementit a tekutost litin je vyšší. Přítomnost v tavenině je nutná. Odlitky jsou homogenní. Pracuje jako odsiřovadlo. [4]

Síra

provádí stabilizaci cementitu jako mangan. Má za důsledek, že litiny s vyšším množstvím síry jsou tvrdší, ale naopak křehčí. Homogenita se zmenší, dále se smrštění zvětší. Proto se obsahově v lepších litinách určuje 0.1 % S a u speciálních litin 0.04 % S. [4]

Fosfor

zvyšuje dobu tuhnutí a zapříčiňuje stabilizaci cementitu. Je vhodný pro odlitky s tenčími stěnami a zvyšuje se obsah až na 2%. Litina je vhodná na součástky s velkou námahou, ale mechanické rázy tento materiál snáší hůře. [4]

Struktura a vlastnosti litiny je závislé na rychlosti ochlazování odlitků. Čím je ochlazování pomalejší, tím je intenzivnější vylučování grafitu. Vzniká litina s lupínkovým grafitem anebo s kuličkovým grafitem. Když je rychlost ochlazování vysoká, zůstane uhlík navázaný v cementitu. V chemickém složení krom uhlíku má velký význam křemík. Ten způsobuje rozpad cementitu na grafit a železo. Křemík uvolňuje z cementitu uhlík dle reakce.[6]



Přidáním křemíku nebo křemíku a vápníku zvyšuje zárodky grafitu. Dále pak křemík podporuje tuhnutí podle stabilní soustavy. Je to takzvaně očkování litiny. Zvýší se tak množství zárodků krystalizace grafitického eutektika. Zmenší se eutektické buňky a zjemní se grafitické částice. V litinách s lupínkovým grafitem je začátek růstu grafitu na cizích částech zárodků, které se vyskytují na povrchu taveniny. Tak se v tavenině ubírá uhlík a následně probíhá druhá fáze eutektika a grafit krystalizuje v šesterečné mřížce. Eutektické buňky se větví do okolí a vytváří se útvary grafitu. Dostává se růžicový neboli přechlazený tvar. [7]

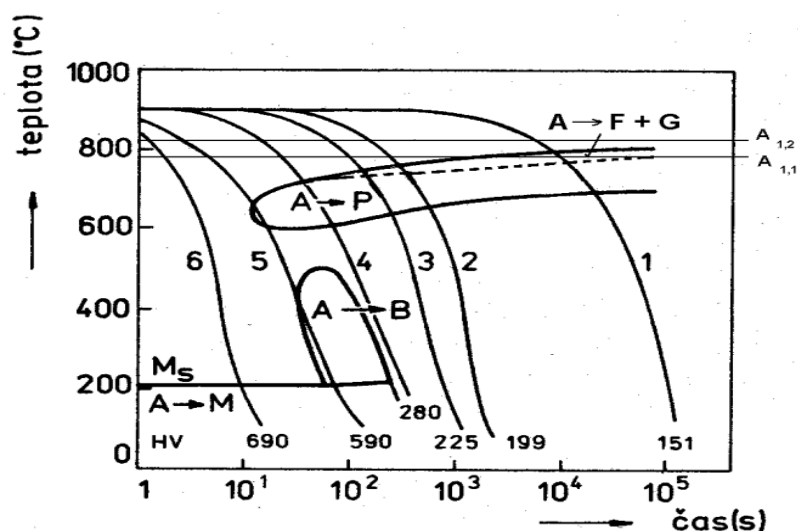
Mechanismy jiného charakteru nám umožňují vzniku grafitového eutektika a vzniká takzvaný lupínkový grafit. To způsobuje modifikace taveniny hořčíkem nebo cérem. Ostatní modifikátorů je více. Hořčík zvyšuje napětí mezi taveninou a grafitem. Naproti lupínkovému grafitu se prvně tvoří zárodky grafitu v kulovitě tvaru těsně vedle sebe. Jsou to kuličky grafitu, vznikají přímo v tavenině. Růst grafitu probíhá jen v difuzi uhlíku v obalu austenitu a tím je zcela oddělen od ostatního materiálu. Tak vzniknou kuličky grafitu, které ztuhnou v oblasti hranic eutektických buněk. [7]

Struktura grafitických litin

Grafitické litiny máme šedá, tvárné, temperované. Grafit ovlivňuje vlastnost litin. Špatné vlastnosti na šedou litinu má hrubý lupínkový grafit. Naopak lepší vlastnosti má jemný lupínkový grafit v naočkované šedé litině. Nejlepší vlastnosti má kuličkový grafit. V litinách grafitických je možný výskyt grafitu lupínkového, zrnitého, vločkového. [7]

3. Fázové přeměny litin v tuhém stavu

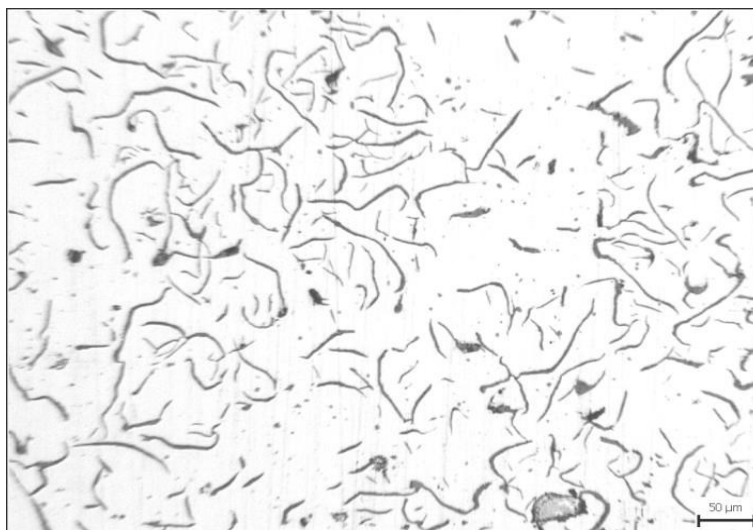
Soustava Fe – C – Si je potřebná v průběhu dalšího ochlazování tuhé litiny stabilní a metastabilní. Eutektikum se rozpadá na austenit na ferit a grafit na perlit. Průběh tvorby feritu a grafitu je v rozmezí teplot $A_{1,2} - A_{1,2}$. V základní kovové matici litiny máme pouze ferit, protože druhý produkt eutektoidní grafit difunduje k eutektickému grafitu. Přeměnu za plynulého ochlazování máme znázorněnou v diagramu ARA. [8]



Obr. 4 Diagram ARA nelegované litiny s kuličkovým grafitem
(3,61 % C, 2,83 % Si, 0,20 % Mn)

Chemické složení litin ovlivňuje fázové přeměny v tuhém stavu. Přísady mají v průběhu vliv na eutektoidní přeměny a stabilizuje karbidickou fázi. Skladba litiny směřující v průběhu eutektoidní přeměna i za pozvolného chladnutí se z austenitu tvoří ferit. U grafitických litin probíhající v metastabilní soustavě vzniká jen perlitická a perliticko feritická matrice. Některé přísady jako například nikl a měď při tuhnutí podporují grafitizaci. Tyto prvky podporují přeměnu austenitu na tvorbu perlitu. Další prvky jako chrom, molybden jsou legující prvky, které mají obrovský význam zejména u strojních odlitků. [7]

3.1 Litiny s lupínkovým grafitem ČSN EN 1561



Obr. 5 Mikrostruktura rozložení lupínkového grafitu

Z šedých litin se jedná o nejpoužívanější litinu. Složení této litiny je většinou podeutektické. Složení této litiny tvoří prvky jako C 2.8 - 3.6 %, Si 1.4 - 2.8 %, Mn 0.5 - 1.0 %, P 0.2 – 0.6 % a maximálně 0.15 % síry. Dalšími legujícími prvky můžou být (Cr, Cu, Mo, Ni, Sn, aj). Rozdělení vykrystalizovaného grafitu tvoří kvalitu litiny. V nejčastějších případech má být struktura perlitická a nejvhodnější je jemný lupínkový grafit. Ferit snižující pevnost a tvrdost je doslova nevhodný. Cementit má za důsledek zvýšení křehkosti a tvrdosti. To nám zhorší obrobiteľnosť. [4]

Abychom zušlechtili tuto litinu, provedeme takzvané očkování litiny. Je to dodání prvků, které podporují grafitizaci. U litin s malým množstvím eutektika se očkují formou ferosilicií a silokokalcia. Jsou to očkovadla ve formě Si, které navyšují počet krystalizačních center. Tímto očkováním dosáhneme jemnějšího zrna grafitu, i lepší vlastnosti mechanické. [4]

Šedá litina má modul pružnosti v tahu od 60000 – 160000 MPa. Je to materiál křehký postrádající tažnost. Čím je množství grafitu větší, tím více je ovlivněn modul pružnosti. U perlitické litiny je tvrdost zhruba 220 HB a s nárůstem feritu a grafitu klesá. Tvrdost čisté feritické litiny je pouhých 120HB. Lupínkový grafit významně snižuje náchylnost na vznik vrubů. Je tak vhodná pro součásti dynamicky namáhané. [4]

3.2 Tvárná litina

Litina se zrnitým, neboli kuličkovým grafitem. Složení této litiny je eutektické, s menším množstvím nečistot. Zrnitost vzniká přidáním hořčíku nebo ceru. Dochází tak k tuhnutí grafitu do tvaru zrn.(5) Po naočkování litiny se dělá grafitizační očkovaní ferosiliciem, neboli mangan má antigrafitizační účinek. Tyto litiny máme feritické, nebo perlitické. Perlitická má vyšší pevnost v tahu. Od 500 – 650 MPa. Menší je v tahu zhruba od 3 – 5 %. Vyžeháním dosáhneme tvárné feritické litiny, s pevností v tahu 400 – 500 MPa a tažnost je 5 -15 %. Tvárná litina má vynikající schopnosti při odlévání, spojené s nízkými náklady na výrobu. Svými schopnostmi je důležitá zejména ve strojírenství. Používá se na odlévání ojníc, klikových hřídelí, těles čerpadel. [4]

3.3 Temperovaná litina

Schopnosti temperované litiny záleží na množství a tvaru grafitu. Grafit je ve tvaru vloček. Vyrábí se temperováním z bílé litiny podeutektické. Litina má většinou složení 2.2 – 3.2 % C, 0.3 – 1.2 % Mn, 0.6 – 1.5 % Si, max. 0.1 % P a 0.15 % S. Výborné třecí vlastnosti. Horší schopnosti při odlévání. Oproti šedé litině se projevuje větší smrštitivostí při chladnutí odlitků. Proto se hodí pro odlitky s jednoduchými tvary a malých rozměrů. Například součásti automobilů s malým namáháním, zemědělské stroje součásti lokomotiv a vagónů. [4]

Temperování u této litiny se provádí grafitizací perlitického nebo ledeburitického cementitu. Dle přeměny cementitu se z těchto odlitků dají udělat tři druhy těchto litin.[4]

- S černým lomem
- S bílým lomem
- Perlitická litina

Temperovaná litina s černým lomem

Litinu temperovanou získáme rozpadem ledeburitického a perlitického cementitu. Tak docílíme struktury s vločkovým grafitem. Temperování se provádí ve dvou fázích. První fáze je při teplotě 950 – 1000 °C. Přeměna ledeburitického cementitu na austenit a grafit. Druhá fáze je rozpad perlitického cementitu. Může proběhnout dvěma způsoby. Přeměnou austenitu

v perlit a poté grafitizací perlitického cementitu na ferit a grafit. Druhý způsob je pomalé ochlazování v mezích eutektických teplot. Dochází k přeměně austenitu. [4]

Temperovaná litina s bílým lomem

Temperovanou litinu získáme oduhličením Bílé litiny. Povrch odlitku nahřejeme na teplotu zhruba 1050°C, kdy za těchto teplot dochází k oduhličení povrchu odlitku. Při oduhličování snižuje se uhlík v austenitu, důsledkem je porušení rovnováhy na hranici cementit – austenit. Rovnováha se obnoví rozpuštěním určitého podílu cementitu v austenitu. Vtom pochodu se rozdíl uhlíku mezi středem a povrchem zmenšuje a tím se snižuje rychlost difuze. Je možné toto provádět u odlitků s tenkou stěnou. U odlitků s hrubou stěnou, je oduhličení neúplné. Vyžihání se provádí buď v plynném prostředí 60 – 100 h a v pevném prostředí 200 h. [4]

Temperovaná litina perlitická

Struktura je základní perlitická matrice obsahující vločkový grafit. Zpracování je ve dvou fázích a provádíme je u odlitků z bílé litiny. V první fázi se žihá v teplotách 950 – 1000 °C. V druhé fázi je grafitizace. To je ochlazení na vzduchu. Docílí se tím struktura jemným lamelárním perlitem. Poté se ještě provádí sferitické žihání u teplot A1. Doba žihání je zhruba 25 h.[4]

4. Tepelné zpracování grafitických litin

V případě nevyhovujících vlastností grafitických litin je možné je tepelně zušlechtit. Požadovaných vlastností se dosáhne takzvaným legováním, při tepelném zpracování. V případě žíhání se vyruší vnitřní pnutí a je lepší obrobiteľnosť. Naopak u kalení se docílí povrchové tvrdosti a houževnatosti proti opotřebení. Izotermickým zušlechtěním dosáhneme houževnatosti a vysoké pevnosti. Toto se používá především u litin s kuličkovým grafitem.[7]

4.1 Žíhání pro snížení tvrdosti

Odlitky určené pro další zpracování se vlivem technologie a výroby procesů vytvoří ledeburitický cementit. V tomto případě se odlitek žihá při teplotách 800 – 950 °C takzvaným grafitizačním žíháním. Doba žíhání je 1 – 4 hodiny. Sferoidizační žíhání se používá u litin, kde ve struktuře chybí ledeburitický cementit a vyšší tvrdost je zapříčiněna jemným perlitem. Žíhání se provádí pod A_{c1} a důsledkem je snížení tvrdosti a lepšímu obrobiteľnosti. [4]

Normalizační žíhání

Způsobuje tvrdost odlitků a zvyšuje pevnost. Děje se to u odlitků z tvárné a šedé litiny. Zejména tehdy, kdy je v litině ferit. Austenit se mění na perlit za teplot 850 – 900°C. Odlitky se chladí na vzduchu.[4]

Zušlecht'ování

Je to u grafitických litin metoda ojedinělá. Důsledek kalení má za příčinu matici tvořenou bajnitkem a martenzitem. V případě kalení grafitických litin je tvrdost nižší. Způsobuje to částice grafitu. Šedá litina po kalení má tvrdost 550 HV. U tvárné litiny je tvrdost 700 HV. Kalení má své výhody a nevýhody. Jelikož lupínkový grafit působí jako generátor vnitřního pnutí, se naopak zvýší pevnost matrice. Zvyšuje se náchylnost k praskání a prasklinám. Čtvrtý bod popouštění vzniká při teplotách nad 600°C, kde většího obsahu křemíku a sekundární grafitizace velice upravuje tvrdost. [4]

Izotermické kalení

U tvárných litin způsobuje izotermické bajnitické kalení dobré mechanické vlastnosti a menší vnitřní pnutí. Po austenitizaci se odlitek ochlazuje v lázni 300 – 350°C. Dochlazení odlitku se provádí na vzduchu po dobu 1 hodiny. Materiál s bajnitickou maticí získá odolnost proti opotřebení a vlivem grafitu dobré třecí vlastnosti. Tak se například vyrábějí válce. [4]

Tab. 1 Hodnoty pevnosti v tahu a tvrdosti podle Brinella litin s lupínkovým grafitem. [8]

Označení litiny		Pevnost v tahu Rm		Tvrdost HB 30		Struktura matrice
značkou Dle ČSN	číselně EN	Dle ČSN	(MPa)	Min.	Max.	
EN-GJL-100	EN-JL1010	42 2410	100-200			Ferit + (perlit)
EN-GJL-HB155	EN-JL2010				155	
EN-GJL-150	EN-JL1020	42 2415	150-250			Ferit + perlit
EN-GJL-HB175	EN-JL2020			100	175	
EN-GJL-200	EN-JL1030	42 2420	200-300			Perlit – ferit
EN-GJL-HB195	EN-JL2030			120	195	
EN-GJL-250	EN-JL1040	42 2425	250-350			Perlit + (ferit)
EN-GJL-HB215	EN-JL2040			145	215	
EN-GJL-300	EN-JL1050	42 2430	300-400			Perlit (očkováná litina)
EN-GJL-HB235	EN-JL2050			165	235	
EN-GJL-350	EN-JL1060	42 2435	300-400			Perlit (očkováná litina)
EN-GJL-HB255	EN-JL2060			185	255	

Závěr teoretické části

I přes tu skutečnost, že litina je dobrý tepelný vodič, nedochází při provozu brzdového kotouče původní konstrukce k dostatečnému odvodu tepla a tím k jeho dostatečnému chlazení. Nedostatečný odvod tepla z materiálu brzdového kotouče má za následek akumulaci tepla v materiálu brzdového kotouče vedoucí ke změnám v povrchových a podpovrchových vrstvách brzdového kotouče.

5. Experimentální část

5.1 Cíl diplomové práce

- Cílem této práce je studium povrchových a podpovrchových změn tepelně ovlivněných oblastí vzniklých při intenzivním brždění brzdového kotouče.

5.2 Metodika experimentálních prací

Hodnocení povrchových a podpovrchových změn u brzdových kotoučů bez úpravy a po úpravě.

- makrostruktura zkoumání povrchu tepelně ovlivněných oblastí
- mikrostruktura povrchu, tepelně ovlivněných oblastí dle ČSN EN 945-1 a ČSN 420461
- mikrostruktura povrchu pomocí replik otiskové světelné mikroskopie za použití kolódiového otisku dle ČSN EN 945-1 a ČSN 420461
- měření tvrdosti podle Vickerse a Brinella
- měření tvrdosti přenosným tvrdoměrem podle Vickerse

5.3 Popis testovaných kotoučů

Byly testovány tři brzdové kotouče firmy PFC Brakes o rozměrech 378x35 mm neznámé jakosti a chemického složení.

- Kotouč č. 1. firmy PFC Brakes sériové výroby bez úprav, klasicky opotřebován.
- Kotouč č. 2. firmy PFC Brakes po úpravě navrtáním systémem GCS a následným testováním.
- Kotouč č. 3. firmy PFC Brakes byl nový, nepoužitý. Na základě výslovného zákazu majitele provádět jakékoli destruktivní zkoušení, bylo provedeno pouze nedestruktivní šetření.

5.3.1 Kotouč č. 1. je opotřebován standardním používáním.

Kotouč firmy PFC Brakes neznámé jakosti a neznámého chemického složení. Kotouč byl použitý. Doba používání a počet najetých kilometrů není znám. Na kotouči byly provedeny destruktivní zkoušky k určení povrchových a podpovrchových změn metalografickým rozborem.



***Obr. 6** Použitý kotouč firmy PFC Brakes.*

5.3.2 Kotouč č. 2. úpravou GCS je opotřebovaný standardním používáním.

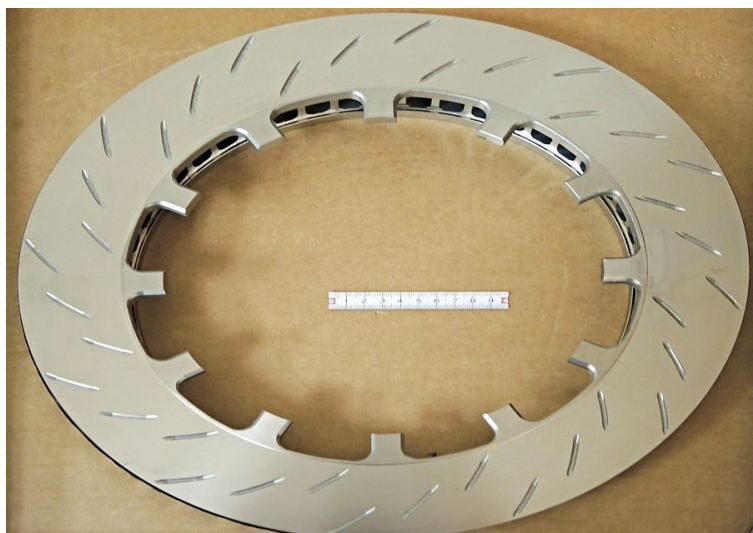
Kotouč firmy PFC Brakes s úpravou GCS neznámé jakosti a neznámého chemického složení. Kotouč byl testován neznámou dobu i ujeté kilometry nejsou známy. Na kotouči se provedly destruktivní zkoušky ke zjištění povrchových i podpovrchových vad.



***Obr. 7** Použitý kotouč firmy PFC Brakes s úpravou GCS.*

5.3.3 Kotouč č. 3. firmy PFC Brakes je nový, nepoužitý.

Kotouč firmy PFC Brakes neznámé jakosti a chemického složení byl nový, nepoužitý. Na kotouči bylo provedeno nedestruktivní metalografické šetření.



***Obr. 8** Nový kotouč firmy PFC Brakes.*

5.4 Popis experimentálních prací

Metalografický rozbor byl proveden v laboratoři na fakultě strojní, katedře mechanické technologie. Na uvedených kotoučích firmy PFC Brakes číslo 1 a 2 byly provedeny destruktivní zkoušky makrostruktury a mikrostruktury. V dalším šetření byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse, Brinella a bylo provedeno měření tvrdosti pomocí přenosného ultrazvukového tvrdoměru Krautkramer MIC 10.

Na kotouči číslo 3, při jeho ceně 1000 eur, se nesměly provádět žádné destruktivní zkoušky, které by mohly poškodit testovaný kotouč. Byla provedena kontrola mikrostruktury pomocí světelné mikroskopie za použití kolódiového otisku. Dále byla provedena zkouška tvrdosti pomocí přenosného ultrazvukového tvrdoměru Krautkramer MIC 10.

5.4.1 Makrostruktura

Z kotouče č. 1 a kotouče č. 2 firmy PFC Brakes neznámé jakosti a chemického složení se vybraly určité části, které byly z kotouče vyřezány vodním paprskem na katedře fyziky. Metoda zaručila nejmenší tepelné ovlivnění zkoumaných vzorků.



Obr. 9 Kotouč č. 2. firmy PFC Brakes při řezání vodním paprskem.

Po vyřezání se jednotlivé vzorky připravily k metalografickému rozboru.

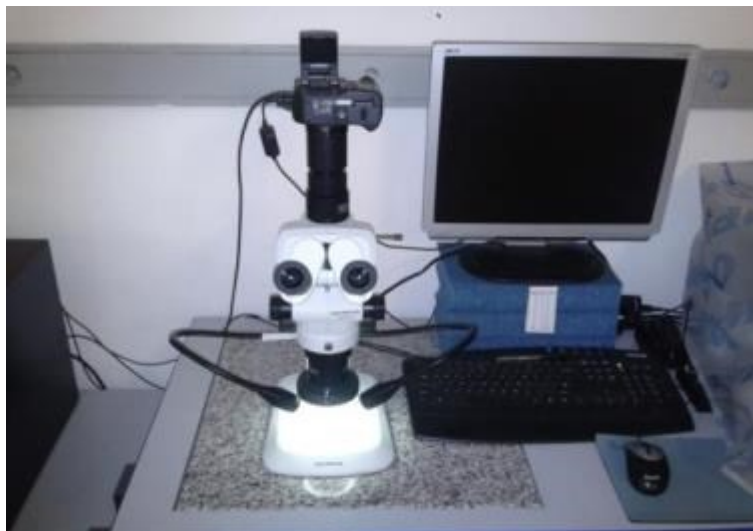
Daná plocha vzorku se vybrousila na brousícím stroji Struers TigraPol – 35. Byly použity brusné papíry o zrnitosti 80, 120, 220, 320 a 400 μ m.



Obr. 10 Brousící stroj TegraPol-35.

Po vybroušení se vzorek opláchnul a osušil. Dále pak bylo provedeno leptání potíráním 15% roztokem HNO_3 . Po leptání se vzorek opláchnul vodou, lihem a vysušil.

Na makrolepty byly popsány a změřeny defekty tepelně ovlivněných oblastí a defekty povrchových vad. Popis a měření bylo provedeno na mikroskopu Olympus SZX7.



Obr. 11 Mikroskop Olympus SZX7

5.4.2 Mikrostruktura

Mikrostruktura byla provedena na kotouči č. 1 a 2. Ze vzorků byly vřezány malé vzorky, které byly zality za tepla do hmoty Multi fast černý, na stroji ProntoPres-20.



Obr. 12 Stroj ProntoPres-20.

Následně se vzorky brousily brusným papírem o zrnitosti $220\ \mu\text{m}$, do rovné plochy na stroji TegraPol-35. Vzorky se po broušení leštily na leštícím plátně s diamantovými

suspensemi o zrnitosti 9 a 3 mikronu. Postup přípravy vzorků byl podle návodu výrobce Struers metodou D. Vzorek byl opláchnut vodou, lihem a osušen vzduchem. Po těchto úkonech se neleptaná struktura zkoumala pod mikroskopem Neophot 21.



***Obr. 13** Obrázek mikroskopu Neophot 21.*

Dalším krokem bylo zkoumání leptaných vzorků. Vzorek byl ponořen do 4% HNO_3 po dobu 5 až 15 sekund. Poté se vzorek opláchnul vodou a lihem. Ofouknut vzduchem a dán pod mikroskop Neophot 21 k hodnocení struktury.

5.4.3 Mikrostruktura pomocí otiskové světelné mikroskopie

Na kotouči č. 3. firmy PFC Brakes neznámé jakosti a chemického složení bylo provedeno zkoumání mikrostruktury za použití kolódiového otisku.



Obr. 14 Kotouč č. 3. firmy PFC Brakes Nový nepoužitý

Neleptaná struktura

Bylo vybráno místo brzdového kotouče, na kterém se provedl experiment. Místo bylo vybroušeno brusným papírem o zrnitosti 400 μm . Poté byl vzorek vyleštěn leštícím plátnem s brusnou pastou o zrnitosti 6 a 3 μm . Místo bylo opláchnuto lihem a vyfoukáno.



Obr. 15 Vyleštěné místo nového kotouče.

Na vyleštěné místo se v několika vrstvách nanese nitrocelulózová hmota.



Obr. 16 Nanášení suspenze na leštěné místo nového kotouče.

Po zaschnutí se obtisk opatrně sejmul a nanesl na připravené sklíčko. Vzorek se prozkoumal na mikroskopu Neophot 21.



***Obr. 17** Vzorek připraven ke zkoumání na mikroskopu Neophot 21.*

Leptaná struktura

Vzorek byl opětovně opláchnut lihem, osušen a nastříkán 4% HNO_3 (Nital). Po působení zhruba 10-15 sekund se vzorek opláchnul vodou, lihem a osušil. Na vzorek byla nanесena suspenze nitrocelulózové (kolodiové) hmoty. Po zaschnutí byl obtisk sejmут a nanесen na sklíčko, které bylo prozkoumáno na mikroskopu Neophot 21.

5.4.4 Měření tvrdosti

Měření probíhalo v metalografické laboratoři katedry mechanické technologie, na tvrdoměru firmy WPM Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH. Dle ČSN EN ISO 6507-4 (V) a ČSN EN ISO 6506-4 (B).



Obr. 18 Tvrdoměr WPM Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH.

Na vzorcích kotouče č. 1 a kotouči č. 2 se provedly testy tvrdosti podle Vikerse a Brinella HV 10 a tvrdost HBW 2.5/187.5. Naměřené hodnoty z vybraných míst byly následně zpracovány do tabulky a vytvořen graf. Na novém kotouči č. 3 nebylo možné toto měření provést.

5.4.5. Měření tvrdosti pomocí přenosného ultrazvukového tvrdoměru Krautkramer MIC 10.

Tuto nedestruktivní metodu měření tvrdosti jsem použil na všech třech kotoučích firmy PFC brakes neznámé jakosti a chemického složení značky. Jedná se o přenosný ultrazvukový tvrdoměr Krautkramer MIC 10.



Obr. 19 Tvrdoměr Krautkramer MIC 10.

6. Výsledky experimentálních prací

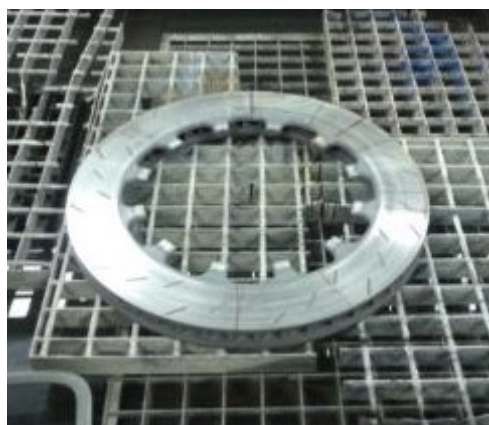
6.1 Kotouč použitý PFC Brakes č. 1

Kotouč firmy PFC Brakes neznámé jakosti a neznámého chemického složení. Kotouč je ze závodního speciálu, opotřebován extrémním způsobem.



Obr. 20 Kotouč firmy PFC Brakes se středící přírubou.

Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění zkušebních vzorků, byl kotouč rozřezán vodním paprskem na katedře fyziky VŠB Technické univerzity Ostrava.



Obr. 21 Snímek z řezání vodním paprskem.



Obr. 22 Vzorek po rozřezání vodním paprskem.



Obr. 23 Ukázka podélného řezu vodním paprskem.

Z použitého brzdového kotouče neznámé jakosti, který v oblastech brzdných ploch vykazoval souvislé síťové trhlin, byly odebrány dva vzorky k metalografickému šetření.

Necelistvosti na povrchu brzdového kotouče lze označit za trhliny napětového charakteru, jejichž vznik byl ovlivněn cyklickým střídáním tepelných cyklů (proměnná tepelná pnutí povrchových vrstev během provozování). V podpovrchových oblastech dochází vlivem prudkého ohřevu vlivem tření a následnému ochlazování k poklesu tvrdosti o cca 20% a strukturním změnám vedoucím ke vzniku trhlin. K šíření takto vzniklých trhlin a dále do materiálu mohl přispět také dendritický charakter mikrostruktury a výskyt výraznějšího lupínkového grafitu.

Metalografické šetření

K metalografickému šetření byly dodány dva výřezy z brzdového kotouče, které jsme si označili 1 (axiálně orientovaný výbrus) a 2 (výbrus v polovině šířky brzdného pásma).

Na povrchu brzdné plochy kotouče se vyskytovalo výrazné síťové trhlin, které bylo nejvýraznější v polovině šířky kotouče, a v blízkosti drážek a povrchů se již nenacházelo. V místech vnějšího i vnitřního povrchu brzdné plochy se vyskytovaly souvislá pásma neovlivněné brzdnými destičkami (původní povrch kotouče). Tyto souvislá pásma šířky cca 0,7 a 0,6 mm u vnějšího a cca 2,8 a 3,4 mm u vnitřního povrchu vykazovala tmavě modré náběhové zbarvení odpovídající teplotám cca 300 °C.

Kontrola makrostruktury dodaných vzorků byla provedena na výbrusech zaznačených na obr 24.

Na makroleptech v oblastech brzdných ploch, které mají mírně konkávní tvar, jsou patrná nesouvislá pásma odlišné leptatelnosti zasahující do hloubky až 3,8 mm na jednom povrchu a až 2,4 mm na protilehlém povrchu (obr. 28 až 31F). Uvnitř těchto pásem konkávního tvaru, která mají po délce rozdílnou svou tloušťku, se vyskytují četné necelistvosti charakteru napěťových trhlin orientovaných převážně kolmo k povrchu kotouče a zasahují do hloubky až 1,2 mm. V odlišném pásmu leptatelnosti je patrné výraznější dendritické uspořádání krystalů, které se mimo tyto oblasti výrazněji nevyskytovalo. U vzorku 1 se v blízkosti přechodového rádia vyskytoval shluk ředin o velikosti až 0,8 mm a u vzorku 2 se uvnitř jedné drážky vyskytovala povrchová necelistvost charakteru trhliny zasahující do hloubky 0,6 mm (obr. 29b-30d).

Kontrola mikrostruktury u obou vzorků byla provedena na výbrusech odebraných v oblastech výskytu necelistvostí a v neovlivněných oblastech kotouče.

Mikrostruktura obou vzorků mimo oblasti ovlivnění je podobná, tvořená grafitem tvaru I (lupínkový), dále lamelárním perlitem o dispersitě lamel nad 1,6 μm a ojediněle vyloučeným cementitem, jehož množství nepřesahuje 2% a je vyloučen v útvarech o velikosti 2000 μm^2 obr. 32 až 34,

Množství, velikost a rozložení grafitu tvaru I bylo ve sledovaných oblastech rozdílné: blízkosti obou povrchů se vyskytoval grafit s rozložením A (rovnoměrné) a C (smíšené) o velikosti 0,25-0,50 mm a 0,5-1 mm a v polovině tloušťky stěny i grafit s rozložením B

(růžicovitý) o velikosti 0,06-0,25 mm. Podobné tomu bylo i v oblasti výztuže, kde se vyskytoval grafit s rozložením A (rovnoměrné) a B (růžicovitý) o velikosti 0,06-0,25 mm.

V podpovrchových ovlivněných oblastech má mikrostruktura obou vzorků lící charakter s náznakem výrazného dendritického uspořádání se zrnitým perlitem (došlo zde k dokonalému rozpadu lamelárního perlitu) – viz obr. 35-36B.

Necelistvosti charakteru trhlin jsou vyplněny okujemi a jejich okolí jeví známky výrazného oduhličení (výrazný výskyt feritu v okolí necelistvostí) – obr. 37A-38D. Lupínkový grafit v oblasti výskytu povrchových necelistvostí byl lemován souvislou vrstvou napenetrovaných oxidů. Zároveň nodule perlitu v ovlivněné oblasti vykazovaly známky výrazného rozpadu. Necelistvosti jsou často rozvětvené a navazují na vyloučený lupínkový grafit, který je v podpovrchové ovlivněné oblasti největší – viz obr. 39-40.

Měření tvrdosti HV10 a HBW 2,5/187,5 bylo provedeno na ploše metalografického výbrusu vzorku č. 2, a to směrem od povrchu přes tloušťku stěny brzdového kotouče. Jedná se o ovlivněná povrchová pásma, kde došlo k poklesu tvrdosti materiálu o cca 20 až 25%. Výskyt grafitu zřejmě snižuje samotnou tvrdost materiálu přibližně o třetinu.

Výsledky zkoušení

- 1) Na brzdných plochách kotouče se vyskytuje síťoví trhlin zasahujících do hloubky max. 1,2 mm
- 2) Povrchová pásma odlišné leptatelnosti (ovlivněná pásma vzniklé teplem při tření) vykazují nerovnoměrnou tloušťku jak po délce, tak i jejich hloubka je rozdílná. To znamená, že jedna brzdná plocha byla vystavena o třetinu vyššímu namáhání než protilehlá plocha.
- 3) Mikrostruktura kotouče v neovlivněných oblastech je tvořena lupínkovým grafitem, lamelárním perlitem s výraznou dispersitou a ojediněle vyloučenými drobnými útvary cementitu.
- 4) Množství, velikost a rozložení lupínkového grafitu s rozložením A (rovnoměrné), B (růžicovitý) a C (smíšené) je ve sledovaných oblastech rozdílné a v podpovrchové ovlivněné oblasti je lupínkový grafit největší.

5) Povrchové necelistvosti charakteru napětových trhlin jsou vyplněny okujemi a jejich okolí jeví známky výrazného oduhličení a penetrace oxidů. Dané oblasti musely být vystaveny teplotám kolem 1000 °C, které způsobily jednak opětovné výrazné dendritické uspořádání se zrnitým perlitem (úplný rozpad lamelárního perlitu) a oduhličení materiálu.

6) Stanovení tvrdosti přes tloušťku stěny kotouče ukazuje na výrazný vliv přítomnosti grafitu (ovlivnění tvrdosti až o třetinu) a samotného způsobu použité metody měření. K výrazným rozdílům (pokles tvrdosti materiálu o cca 20%) došlo do vzdálenosti cca 2000-2500 μm od vnějšího povrchu kotouče (jednalo se o ovlivněné povrchové pásmo). Tvrdost kotouče mimo oblasti ovlivnění činí cca 190 HV10 a 180 HBW 2,5.

Závěr metalografického šetření použitého brzdového kotouči č. 1.

Brzdový kotouč byl odlit a tepelně zpracován na tvrdost cca 190 HV10. Mikrostruktura odlitku je tvořená lamelárním perlitem s výraznou dispersitou (pozdvolné ochlazování odlitku), ojedinělými drobnými útvary cementitu a lupínkovým grafitem, jehož množství a velikost rozložení bylo ve sledovaných oblastech rozdílné. To ovlivňovalo v podpovrchových oblastech přednostní šíření povrchových trhlin po výraznějších lupíncích grafitu.

Ke vzniku necelistvostí na povrchu brzdového kotouče došlo v důsledku cyklického střídání tepelných cyklů (proměnná tepelná pnutí) v povrchových vrstvách. Vlivem prudkého ohřevu vzniklého třením na teploty kolem cca 1000 °C a následné ochlazování dochází v daných oblastech ke změnám mikrostruktury a vlastností materiálu vedoucím ke vzniku povrchových iniciačních trhlin napětového charakteru, které se během provozu mohou šířit dále do materiálu.

Fotky dodaných vzorků



Obr. 24 Vzorek 1a)



***Obr. 25** Vzorek 1 b) protilehlý povrch.*

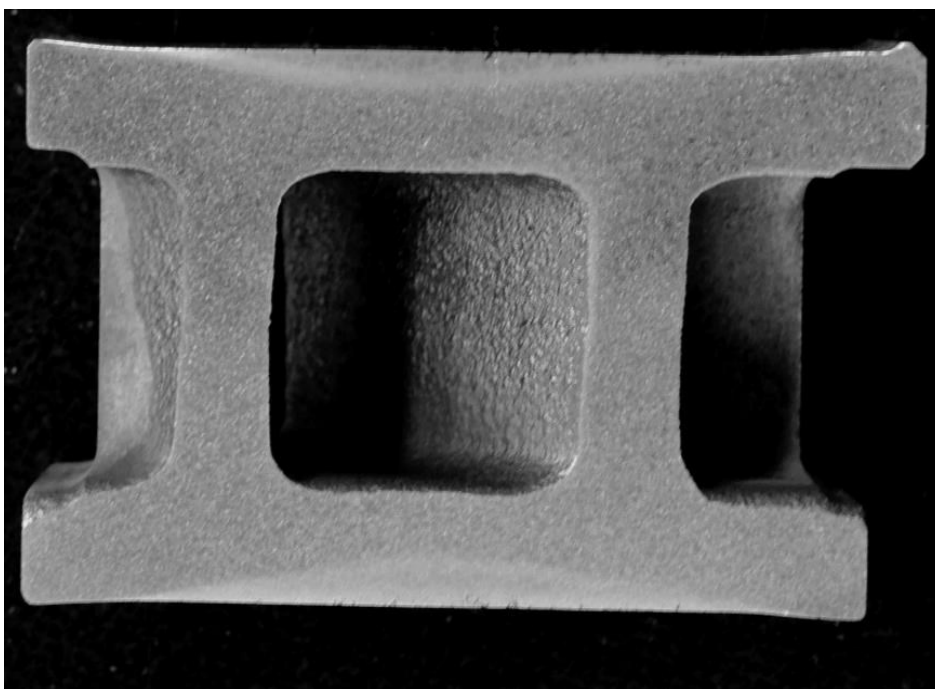


***Obr. 26** Vzorek 2*

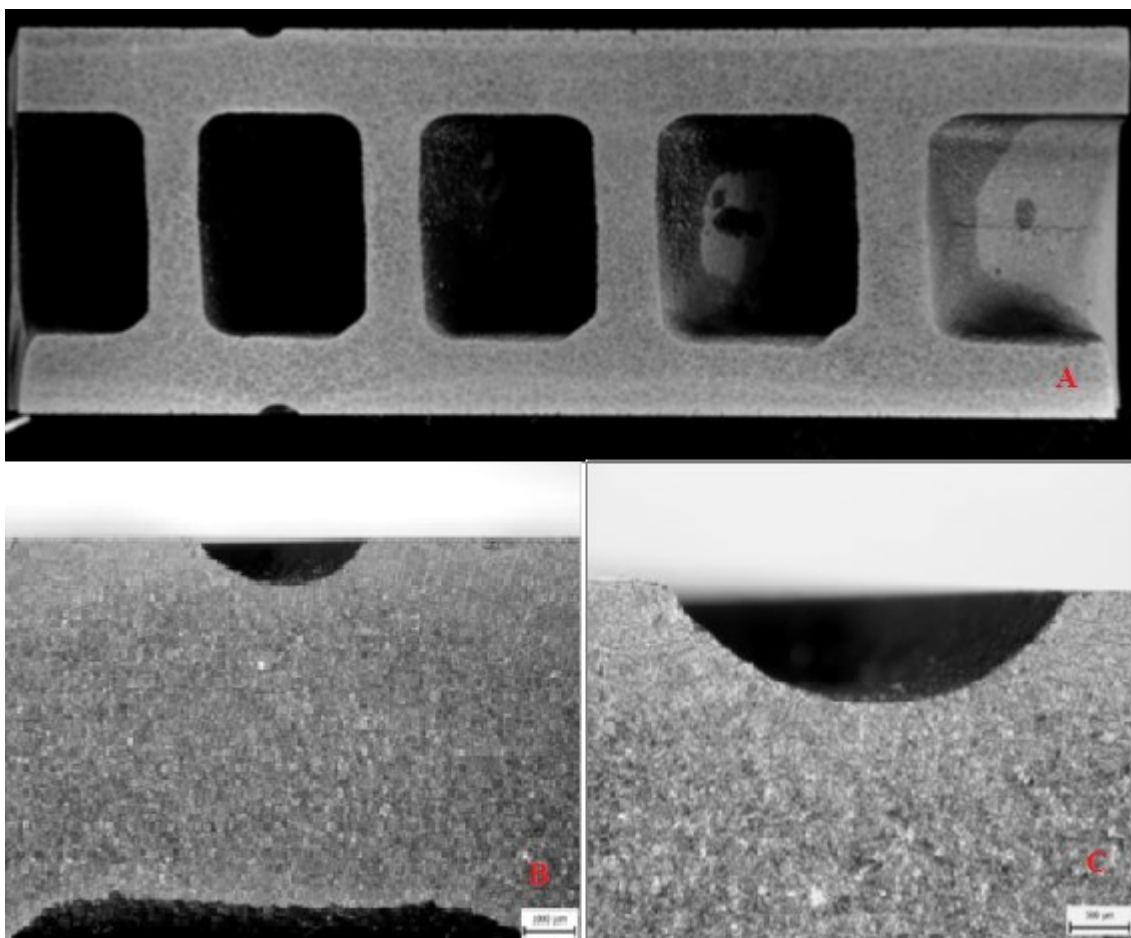


***Obr. 27** Vzorek 2 (protilehlý povrch)*

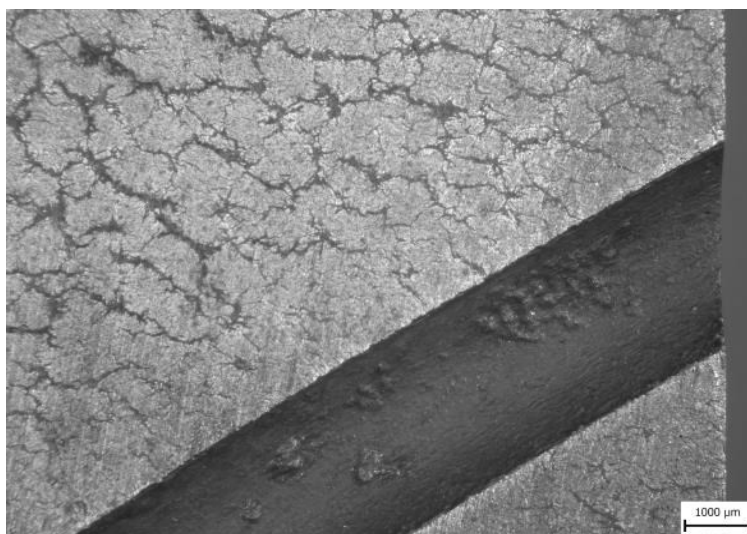
Makrostruktura- leptáno 15% HNO_3



***Obr. 28** Vzorek 1 makrostruktura – leptáno 15% HNO_3 .*



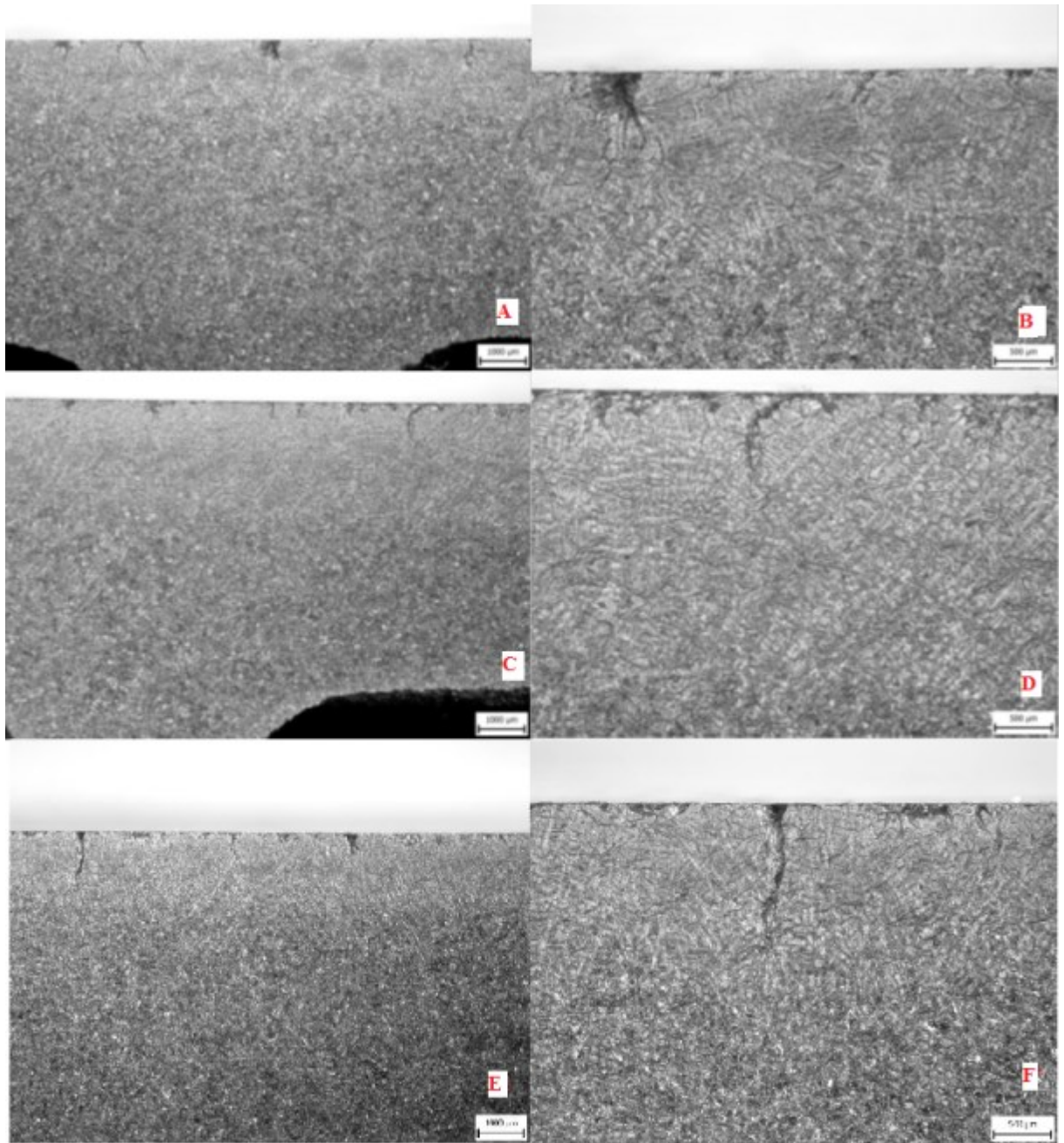
Obr. 29 A) Vzorek 2 B)Detail oblasti drážky C)Detail trhliny uvnitř drážky. leptáno 15% HNO_3



Obr. 30 d) Detailní snímek trhliny uvnitř drážky.

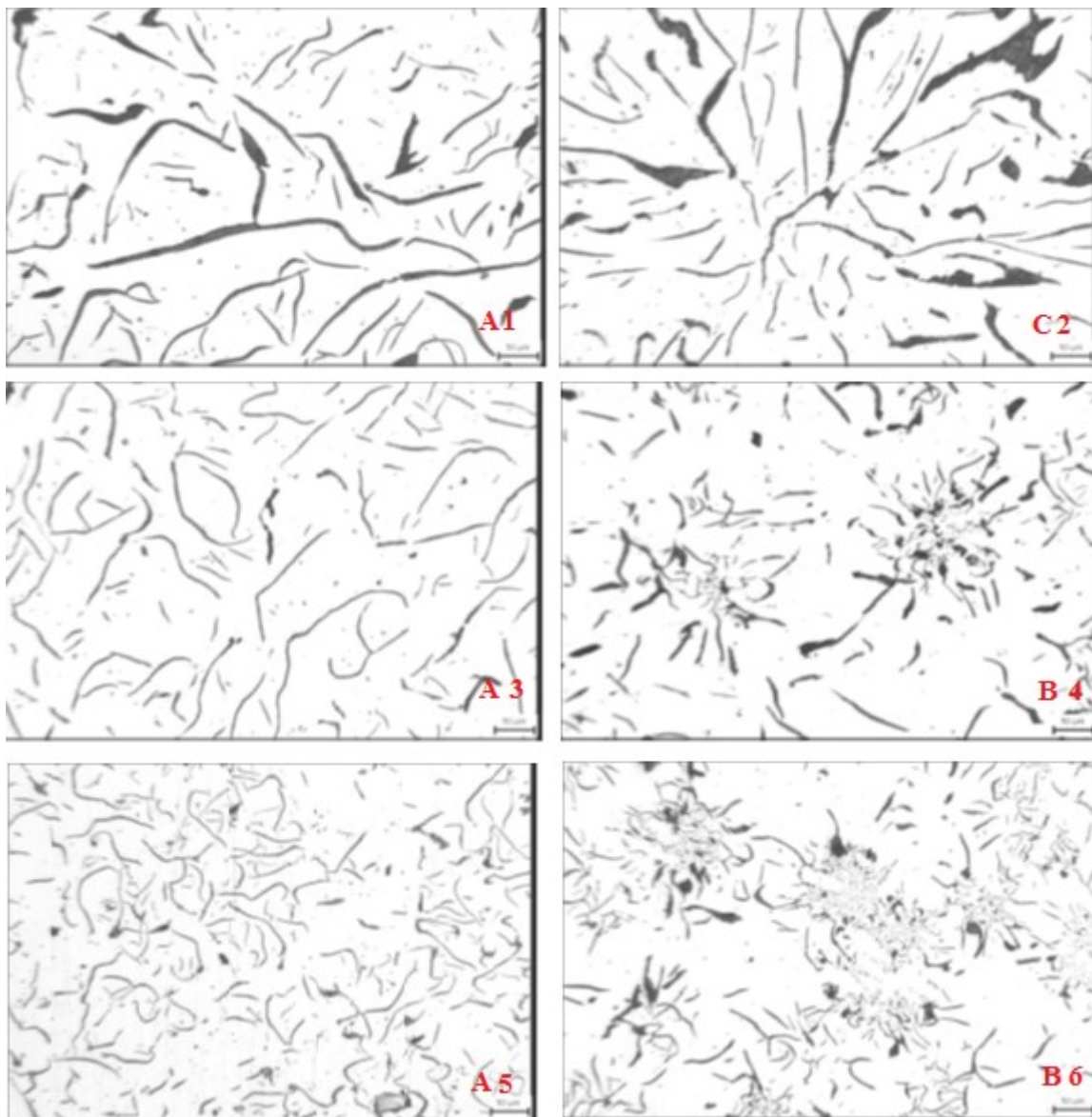
Makrostruktura vzorku 2 (detail povrchových necelistvostí)

Leptáno 15% HNO_3 .



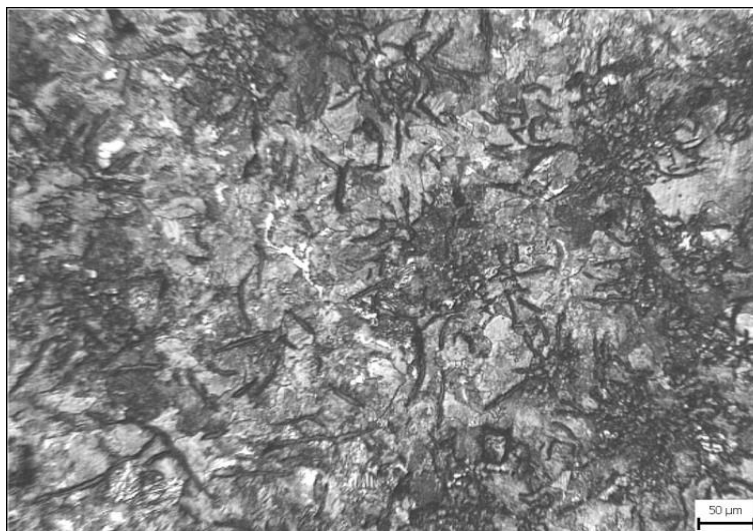
Obr. 31 A) Detaily povrchových necelistvostí brzdových kotoučů leptaných 15% HNO_3 B) detail k A. D) detail k C. - F) detail k E

Mikrostruktura vzorku 1 (neleptáno)
Rozložení lupínkového grafitu přes průřez kotouče.

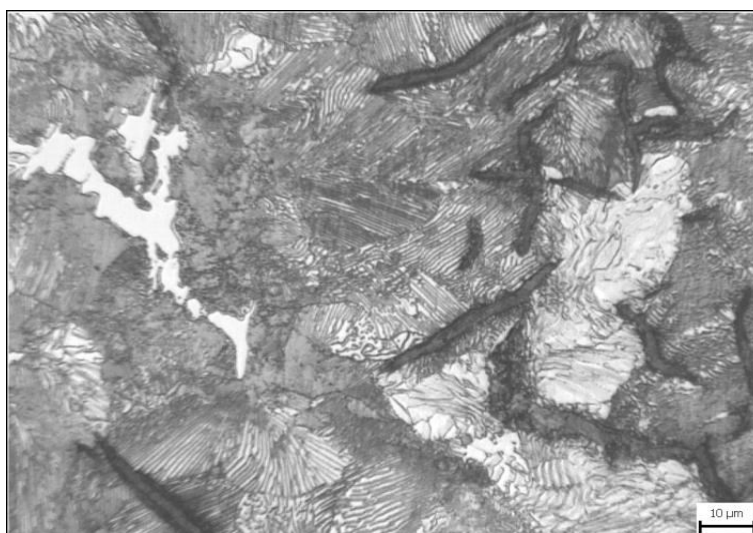


Obr. 32 Rozložení grafitu přes průřez kotouče. A1) Podpovrchová oblast (A) C2) Podpovrchová oblast (C) A3) V polovině tl. stěny (A) B4) V polovině tl. Stěny (B) A5) Oblast výztuže (A) B6) Oblast výztuže (B).

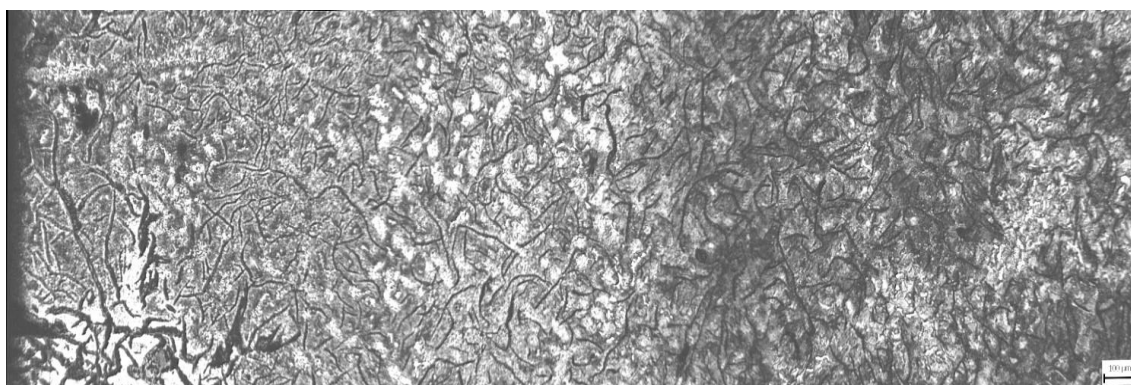
Mikrostruktura – vzorek 1. Leptáno 4% HNO_3



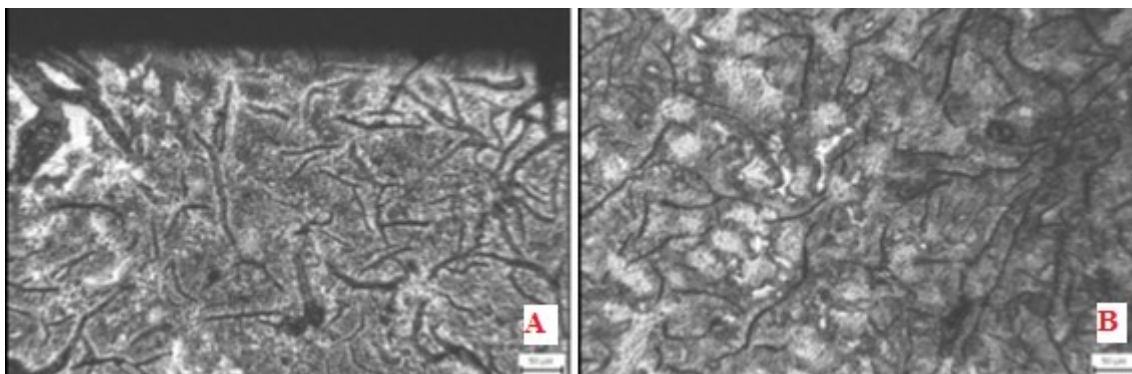
***Obr. 33** Oblast výztuže.*



***Obr. 34** Detail oblasti výztuže.*



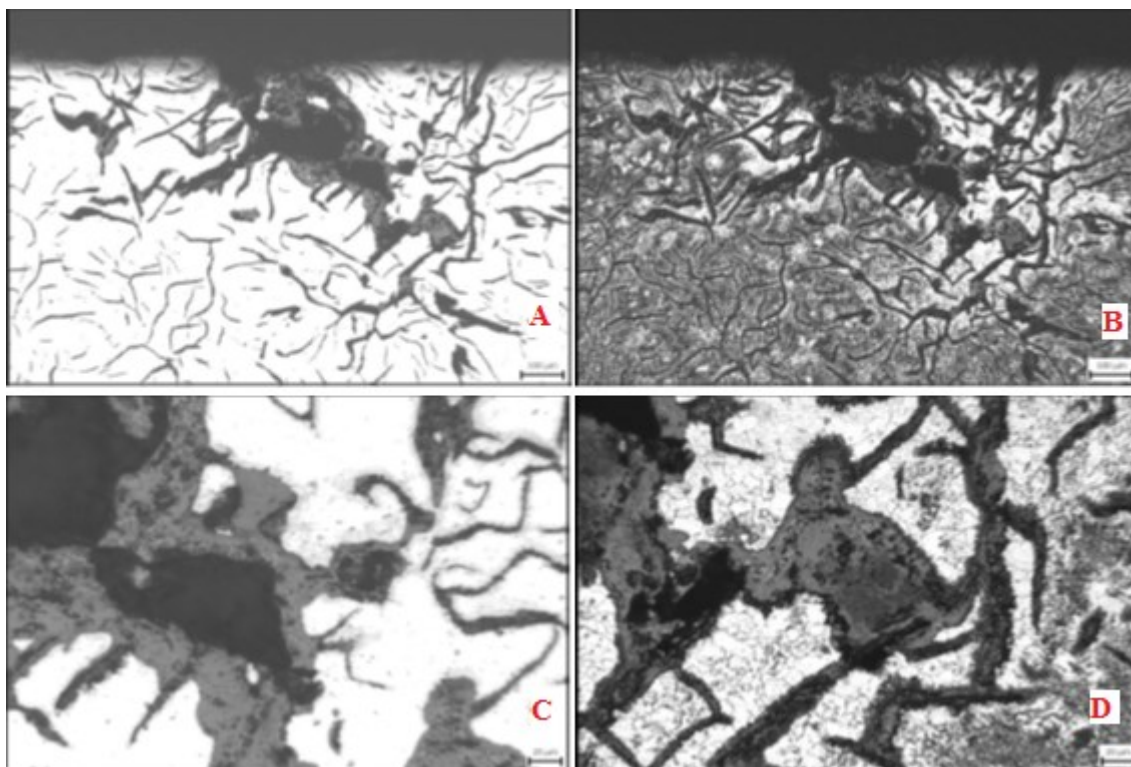
***Obr. 35** Průběh povrchu ovlivněného pásma.*



Obr. 36 A) Podpovrchová oblast. B) Přejímová oblast ovlivnění.

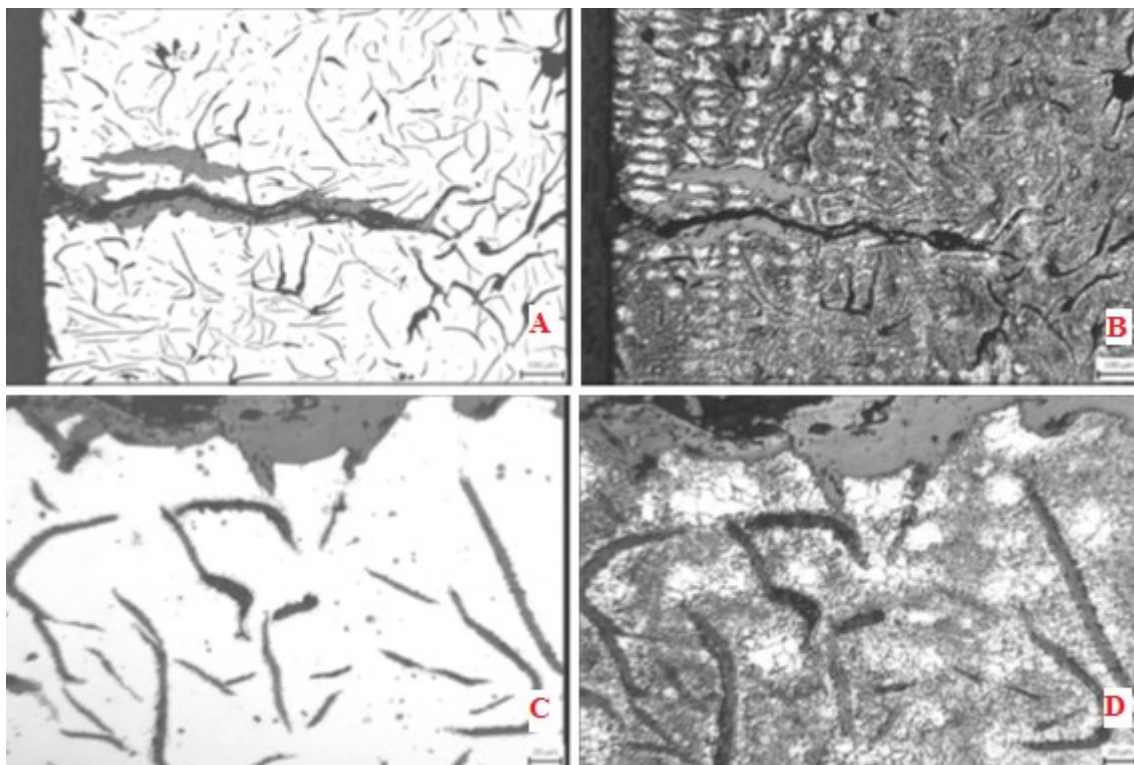
Mikrostruktura – vzorek 1

Průběh povrchové necelistvosti



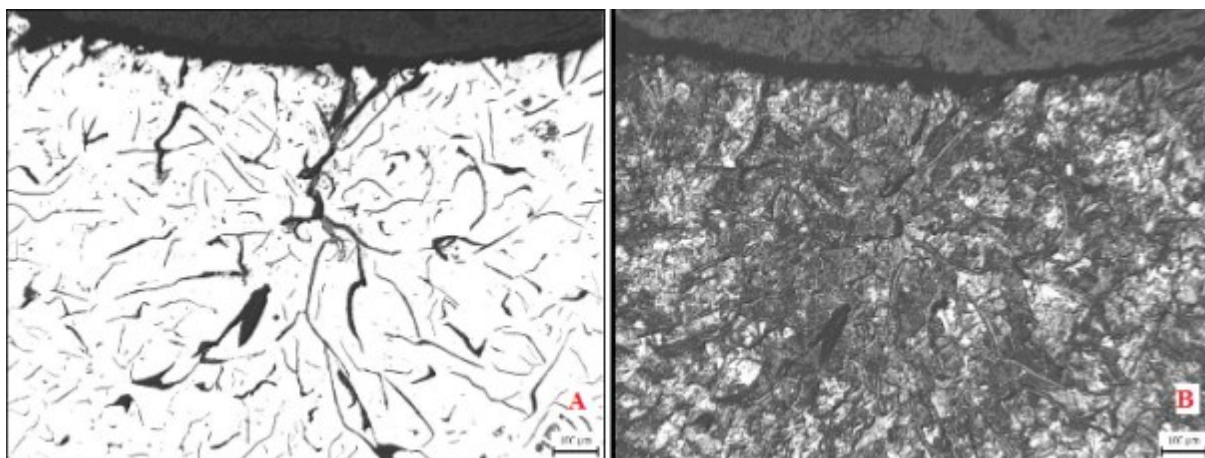
Obr. 37 A) Povrchová necelistvost- neleptáno. B) Povrchová necelistvost- leptáno 4% HNO_3 .
C) Detail. obr. A D) Detail obr. B.

Mikrostruktura – vzorku 2
Průběh povrchové necelistvosti

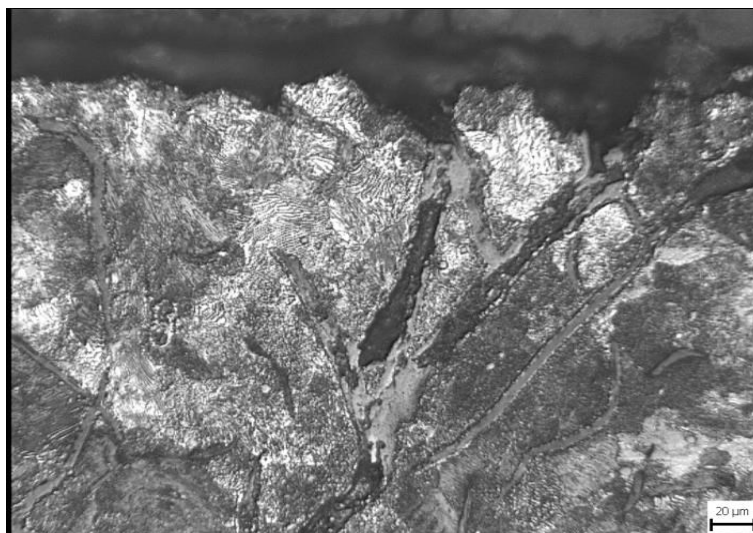


Obr. 38 A) Povrchová necelistvost – neleptaná. B) Povrchová necelistvost – Leptaná 4% HNO_3 . C) Detail k obr. A. D) Detail leptaného povrchu obr. B.

Mikrostruktura – vzorek 2
Průběh povrchové necelistvosti v oblasti drážky



Obr. 39 A) Povrchová necelistvost v oblasti drážky – neleptáno. B) Povrchová necelistvost v oblasti drážky – leptáno 4% HNO_3



Obr. 40 Detail k obr. 39 B)

6.2 Kotouč s úpravou GCS č. 2



Obr. 41 Kotouč č. 2 s úpravou GCS.

Použitý brzdový kotouč s úpravou GCS neznámé jakosti a chemického složení. V oblastech brzdných ploch vykazoval ojedinělý náznak síťové trhlin, byl určen k metalografickému šetření.

Provedenou úpravou odlitku brzdného kotouče docházelo během jeho používání (cyklická střídání tepelných cyklů prudkým ohřevem vzniklým třením na teploty kolem cca 800°C k následnému intenzivnímu ochlazování, které mělo vliv jak na snížení opotřebení brzdných

ploch, tak i ke strukturním změnám v povrchové vrstvě s tímto související (vznik zákalných struktur). To rovněž vedlo ke vzniku drobných a plytkých povrchových trhlin napětového charakteru. Zda kotouč bude provedenou úpravou splňovat i další technické požadavky, nejsme schopni posoudit

Vlastní brzdový kotouč byl odlit a tepelně zpracován na tvrdost 230 HV10, resp. 220 HBW2,5/187,5, jehož mikrostruktura byla ve sledovaných oblastech vcelku podobná lišící se nepatrně pouze v množství, velikosti a rozložení lupínkového grafitu.

Metalografické šetření

Upravený a již použitý brzdový kotouč byl dělen na dílčí části dokumentované na obr. 1. Výřezy z brzdového kotouče určené k metalografickému šetření jsme si označili **1** (axiálně orientovaný výbrus) a **2A**, **2B** (výbrus v polovině šířky brzdného pásma) – viz obr. 42-43. Zbylé výřezy zachytily charakter a způsob provedené úpravy kotouče. Na dělených plochách vzorku **2** byl patrný výskyt shluku ředin vyskytujících se v oblasti přechodu výztuže brzdná část kotouče. Obr. 64. Samotné vrtané otvory místy vystupovaly až na samotný povrch výztuže.

Na povrchu brzdné plochy kotouče se zejména v okolí vrtaných otvorů vyskytovalo nevýrazné síťové trhlín, které bylo nejčtenější v polovině šířky kotouče, a v blízkosti drážek a povrchů se již nenacházelo (obr. 44, 47). Tyto trhlíny se místy vzájemně mezi vrtanými otvory propojovaly. V místech vnějšího i vnitřního povrchu brzdné plochy se vyskytovaly souvislá pásma neovlivněné brzdými destičkami (původní povrch kotouče), která dosahovala šířky cca 3 a 2,5 mm u vnějšího a cca 4,5 a 5 mm u vnitřního povrchu a vykazovala světle modré náběhové zbarvení odpovídající teplotám cca 310 °C.

Kontrola makrostruktury dodaných vzorků byla provedena na výbrusech zaznačených na obr. 42 - 43. Na makroleptech v oblastech brzdných ploch je patrný náznak nesouvislého pásma odlišné leptatelnosti zasahující do hloubky až 1,05 mm na jednom povrchu a až 1,1 mm na protilehlém povrchu (obr. 48-54). Uvnitř těchto pásem, která mají po délce rozdílnou svou tloušťku, se místy vyskytují drobné povrchové necelistvosti charakteru napětových trhlin orientovaných převážně kolmo k povrchu kotouče zasahující do hloubky až 0,33 mm. Uvnitř jedné drážky se vyskytovala povrchová necelistvost charakteru trhlíny zasahující do hloubky 0,2 mm (obr. 45b-47d).

Kontrola mikrostruktury u daných vzorků byla provedena na výbrusech odebraných v oblastech výskytu necelistvostí a v neovlivněných oblastech kotouče.

Mikrostruktura vzorků mimo oblasti ovlivnění je podobná, tvořená grafitem tvaru I (lupínkový), dále lamelárním perlitem o dispersitě lamel nad $1,6\text{ }\mu\text{m}$, ojediněle vyloučeným cementitem, jehož množství nepřesahuje 2% a je vyloučen v útvarech o velikosti $2000\text{ }\mu\text{m}^2$ a místy vyloučeným feritem, jehož množství nepřesahuje 2% – obr. 55 až 59.

Množství, velikost a rozložení grafitu tvaru I bylo ve sledovaných oblastech rozdílné: v blízkosti obou okrajů, u vnějšího povrchu a v polovině tloušťky stěny kotouče se vyskytoval grafit s rozložením A (rovnoměrné) a C (smíšené) o velikosti $0,12\text{--}0,25\text{ mm}$, resp. $0,06\text{--}0,12\text{ mm}$ a u vnitřního povrchu i grafit s rozložením B (růžicovitý) o velikosti $0,12\text{--}0,25\text{ mm}$. Podobné tomu bylo i v oblasti výztuže, kde se grafit vyskytoval tvaru I s rozložením A (rovnoměrné) a grafitu tvaru V o velikosti $0,015\text{--}0,030\text{ mm}$.

V podpovrchových ovlivněných oblastech se vyskytovalo pásmo s výskytem zakalených struktur, jako jsou popuštěný bainit a jehlice martensitu s ojediněle vyloučeným zbytkovým austenitem (obr. 60 až 63). Toto pásmo dosahovalo šířky až $150\text{ }\mu\text{m}$. Na pásmo základních struktur navazovalo pásmo se zrnitým perlitem (zde došlo k dokonalému rozpadu lamelárního perlitu). Uvnitř materiálu i v blízkosti přechodového rádiusu se vyskytovaly mikrořediny i samotný shluk ředin o velikosti až $1,6\text{ mm}$ (obr. 64).

Necelistvosti charakteru trhlin, které jsou převážně vyplněny grafitem a jejich okolí nejeví známky oduhličení či jiných změn, jsou často rozvětvené a navazují na vyloučený lupínkový grafit, – obr. 65-67.

Výsledky zkoušení

1) Na brzdných plochách kotouče, které nevykazovaly výraznější opotřebení, se vyskytoval náznak síťových trhlin zasahujících do hloubky max. $0,33\text{ mm}$.

2) Pásmo odlišné leptatelnosti (ovlivněná pásma vzniklým teplem třením) vykazují po délce nerovnoměrnou tloušťku, která je na obou brzdných plochách podobná a dosahuje do hloubky až $1,1\text{ mm}$.

3) Mikrostruktura kotouče mimo podpovrchovou třením ovlivněnou vrstvou je podobná, tvořená lupínkovým grafitem, lamelárním perlitem s výraznou dispersitou, ojediněle vyloučenými drobnými útvary cementitu a místy vyloučeným feritem. Jediným rozdílem je zde pouze množství, velikost a rozložení lupínkového grafitu ve sledovaných oblastech, kde se lupínkový grafit vyskytoval s rozložením A (rovnoměrné), B (růžicovitý) a C (smíšené). V oblasti výztuže se vyskytoval náznak nedokonale zrnitého grafitu a lupínkový grafit s rozložením D (neusměrněný mezidendritický).

4) V podpovrchových ovlivněných oblastech se vyskytovalo pásmo dosahující tloušťky až 150 μm , uvnitř kterého se vyskytovaly zakalené struktury (popuštěný bainit a jehlice martensitu s ojediněle vyloučeným zbytkovým austenitem).

5) Povrchové necelistvosti jsou často rozvětvené a navazují na vyloučený lupínkový grafit, který je v podpovrchové ovlivněné oblasti nejvýraznější.

6) Dané oblasti musely být vystaveny teplotám kolem cca 800 °C, při kterých mohlo v důsledku intenzivního chlazení dojít ke vzniku pásma zákalných struktur.

7) Stanovení tvrdosti přes tloušťku stěny kotouče ukazuje na výrazný vliv přítomnosti grafitu, kterému jsme se zejména při měření tvrdosti snažili vyhnout.

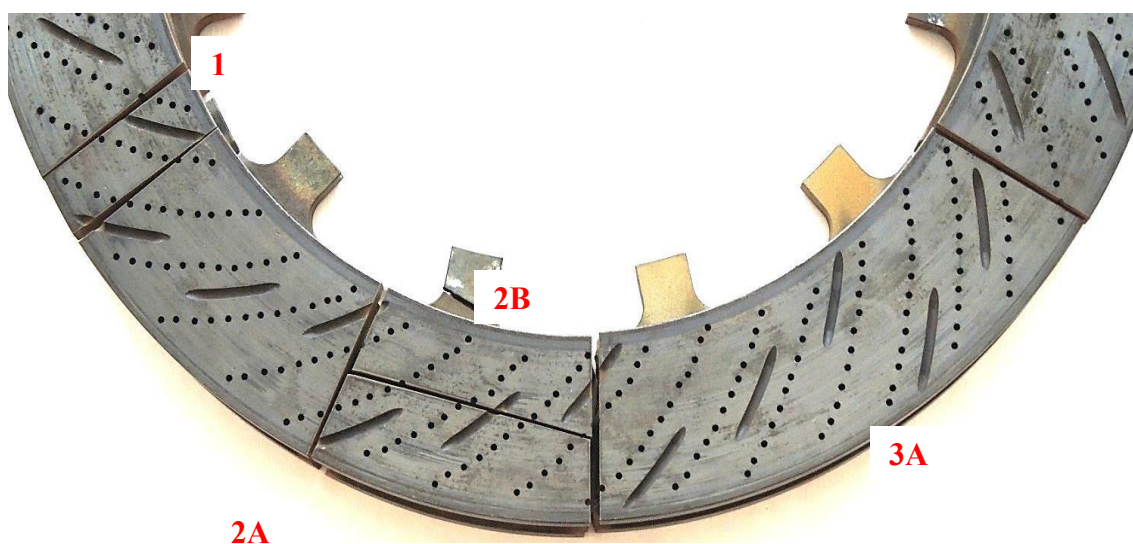
8) Při měření tvrdosti HV10 a tvrdosti HBW2,5/187,5 byly ve sledovaných oblastech zjištěny vcelku srovnatelné výsledky měření (vzájemný rozdíl v naměřených hodnotách nepřesahuje 10 %). Tvrdost kotouče mimo oblasti ovlivnění činí 230 HV10, resp. 220 HBW2,5/187,5.

Závěr metalografického šetření brzdového kotouče s úpravou GCS č. 2.

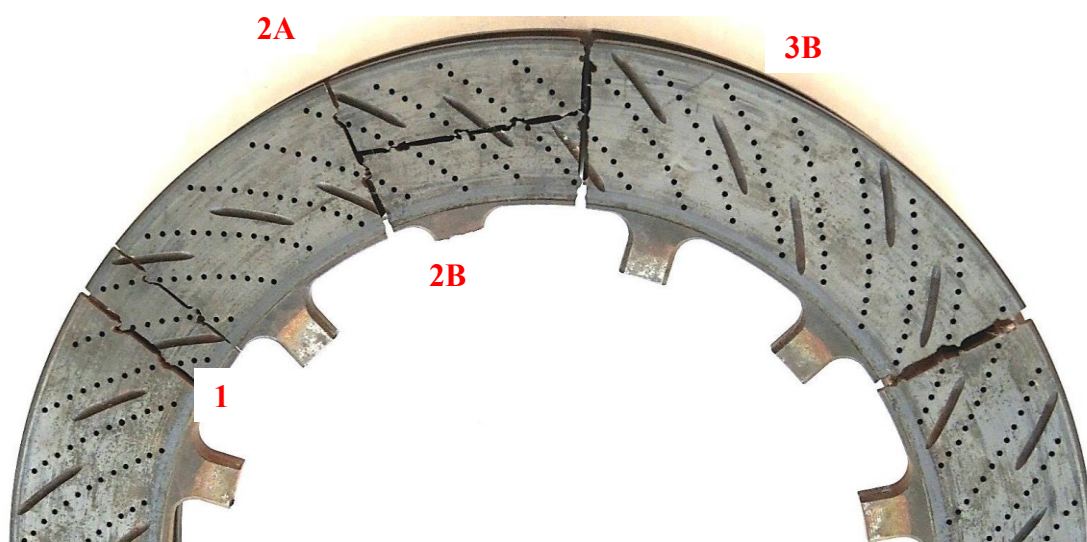
Mikrostruktura odlitku kotouče je ve sledovaných oblastech podobná, tvořená lamelárním perlitem s výraznou dispersitou, ojediněle vyloučenými drobnými útvary cementitu, místy vyloučeným feritem a lupínkovým grafitem. V podpovrchové ovlivněné oblasti ovlivňovalo přednostní šíření povrchových trhlin po lupíncích grafitu. V oblasti výztuže se vyskytoval náznak nedokonale zrnitého grafitu a lupínkový grafit. Brzdový kotouč byl odlit a tepelně zpracován na tvrdost 230 HV10, resp. 220 HBW2,5/187,5.

Vlivem prudkého ohřevu vzniklého třením na teploty kolem cca 800 °C a následnému intenzivnímu ochlazování docházelo v daných oblastech ke změnám mikrostruktury (vznik pásma zakalených struktur) a vlastností materiálu (snížení opotřebení brzdných ploch), které mají vliv i na samotnou životnost kotouče. Zda kotouč bude splňovat i další technické požadavky, nejsme schopni posoudit.

Ke vzniku drobných povrchových trhlin napětového charakteru dochází na povrchu brzdného kotouče v důsledku cyklického střídání tepelných cyklů (proměnná tepelná pnutí).



Obr. 42 Čelní plocha děleného kotouče.



Obr. 43 Vnitřní plocha děleného kotouče (protilehlý povrch).

Detaily povrchu brzdových ploch



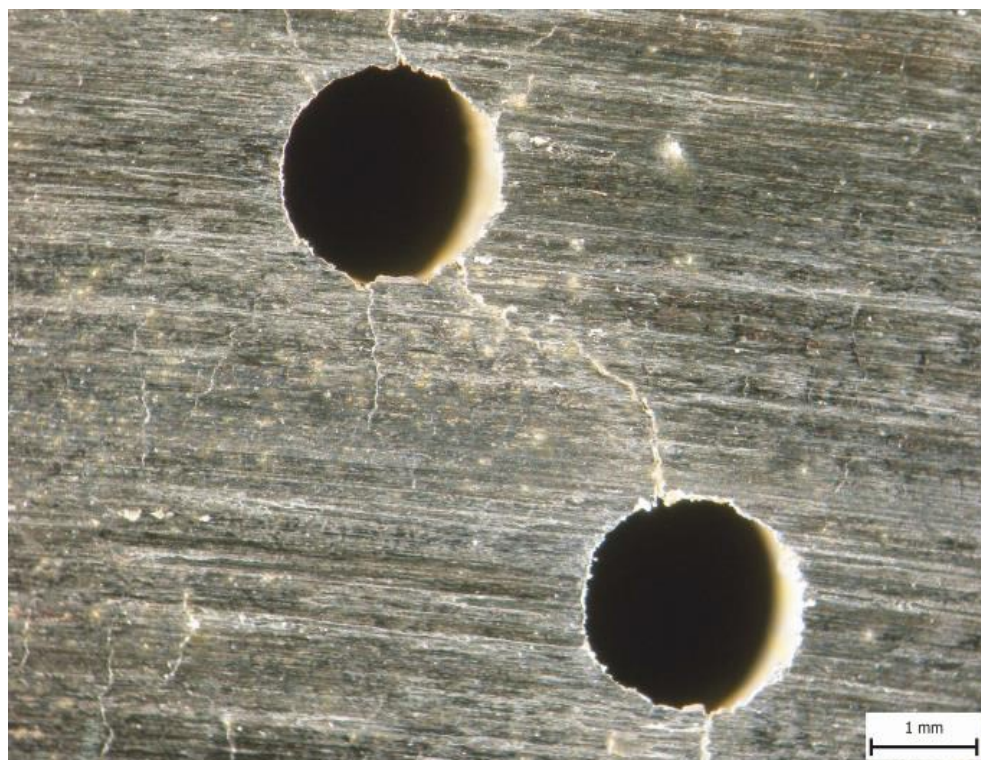
Obr. 44a) Povrch se síťovím



Obr. 45b) Detail povrchu.

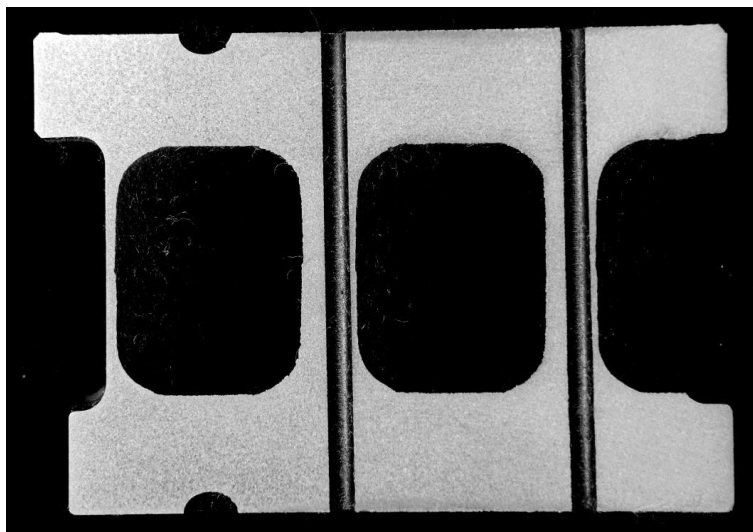


Obr. 46c) Další oblast se síťovým trhlin.

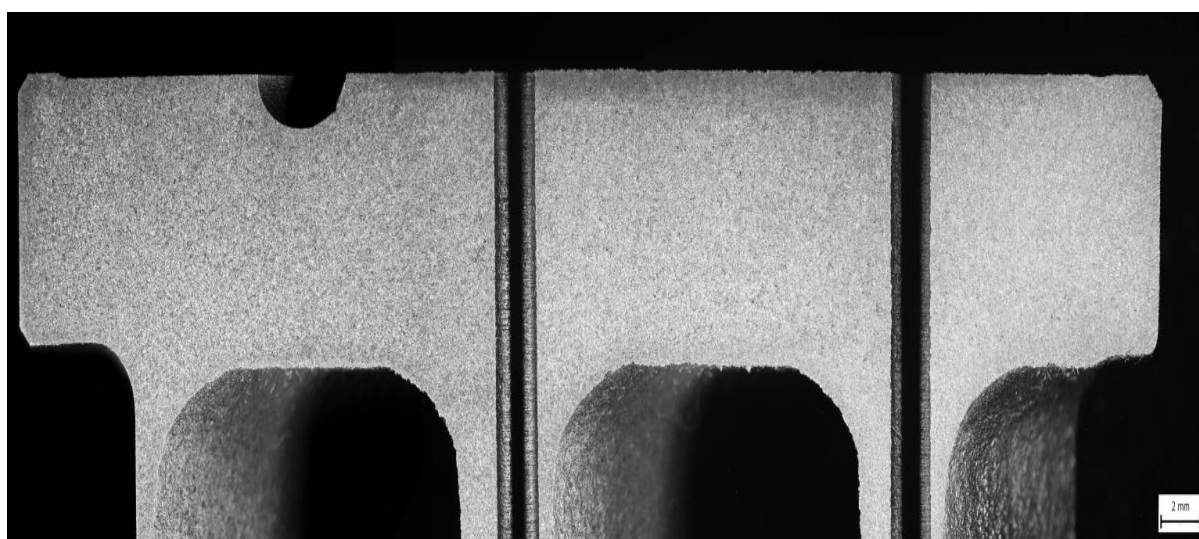


Obr. 47d) Detail síťovi trhlin.

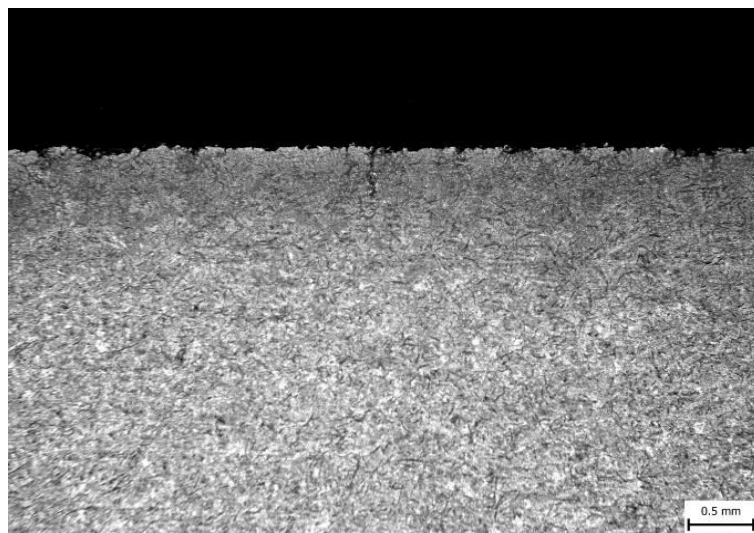
Makrostruktura – leptáno 15% HNO_3



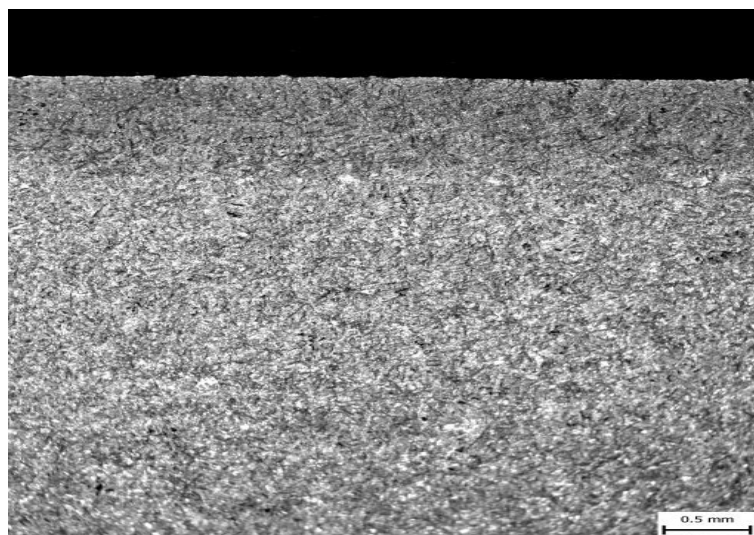
Obr. 48 Vzorek 1. Leptáno 15% HNO_3 .



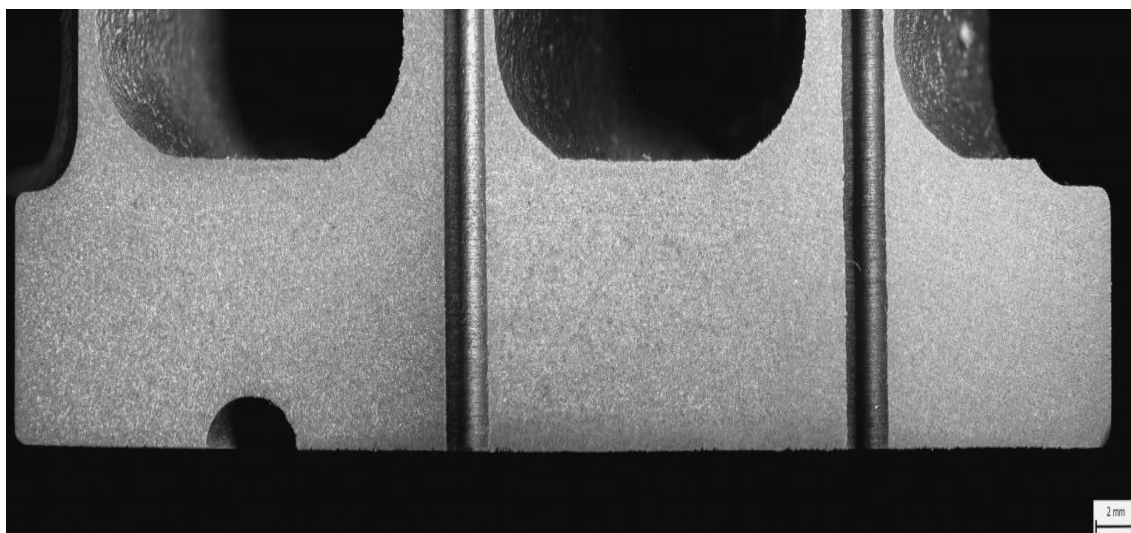
Obr. 49 Detail oblasti vnitřní plochy vzorku.



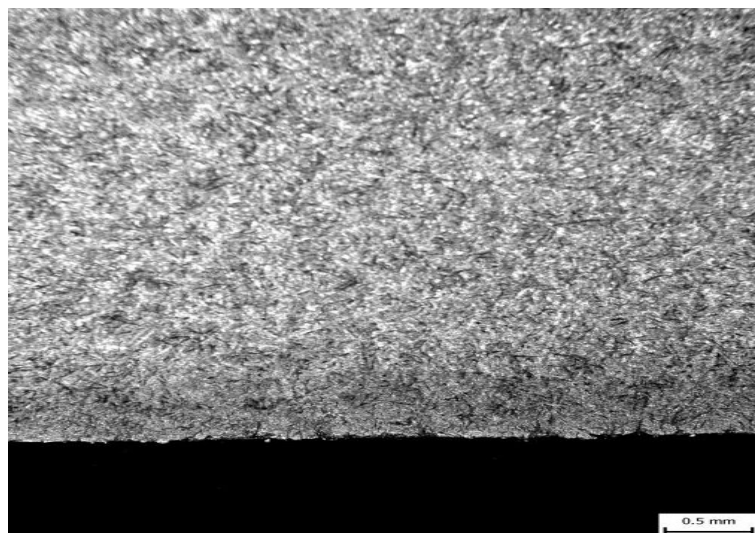
***Obr. 50** Detail povrchových ovlivněných oblastí*



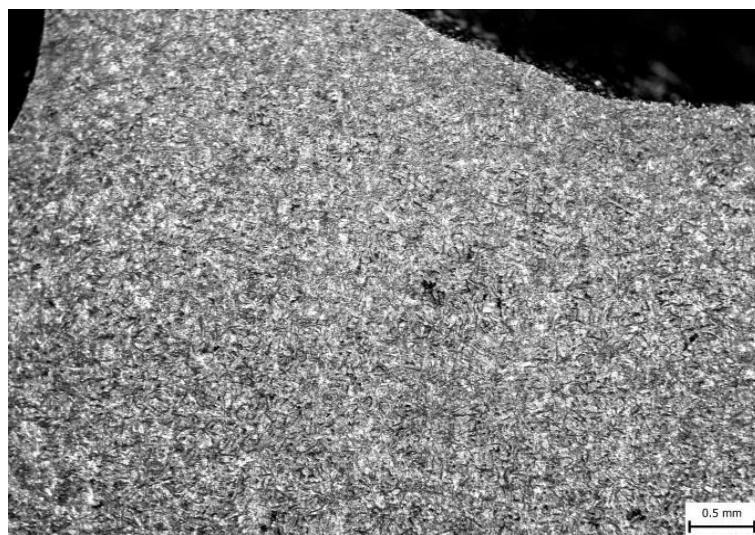
***Obr. 51** Detail ovlivněné oblasti*



***Obr. 52** Detail oblasti vnější plochy vzorku.*



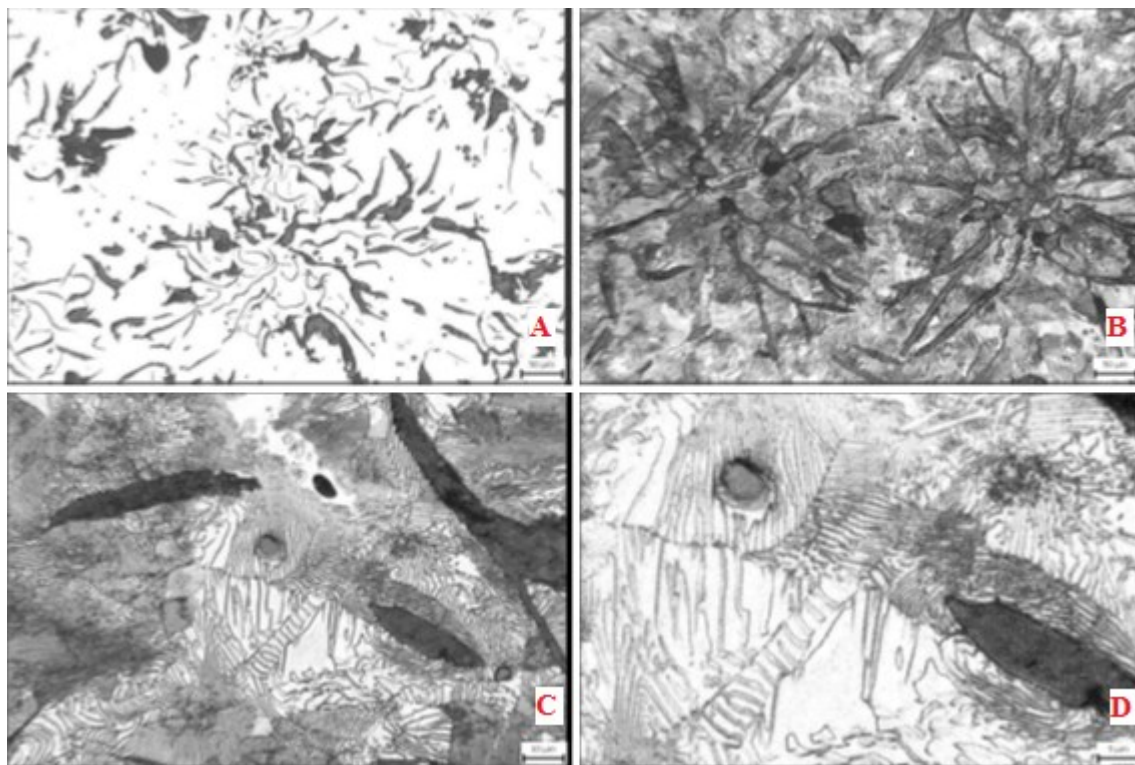
***Obr. 53** Detail povrchové ovlivněné vrstvy.*



***Obr. 54** Detail ovlivněné vrstvy*

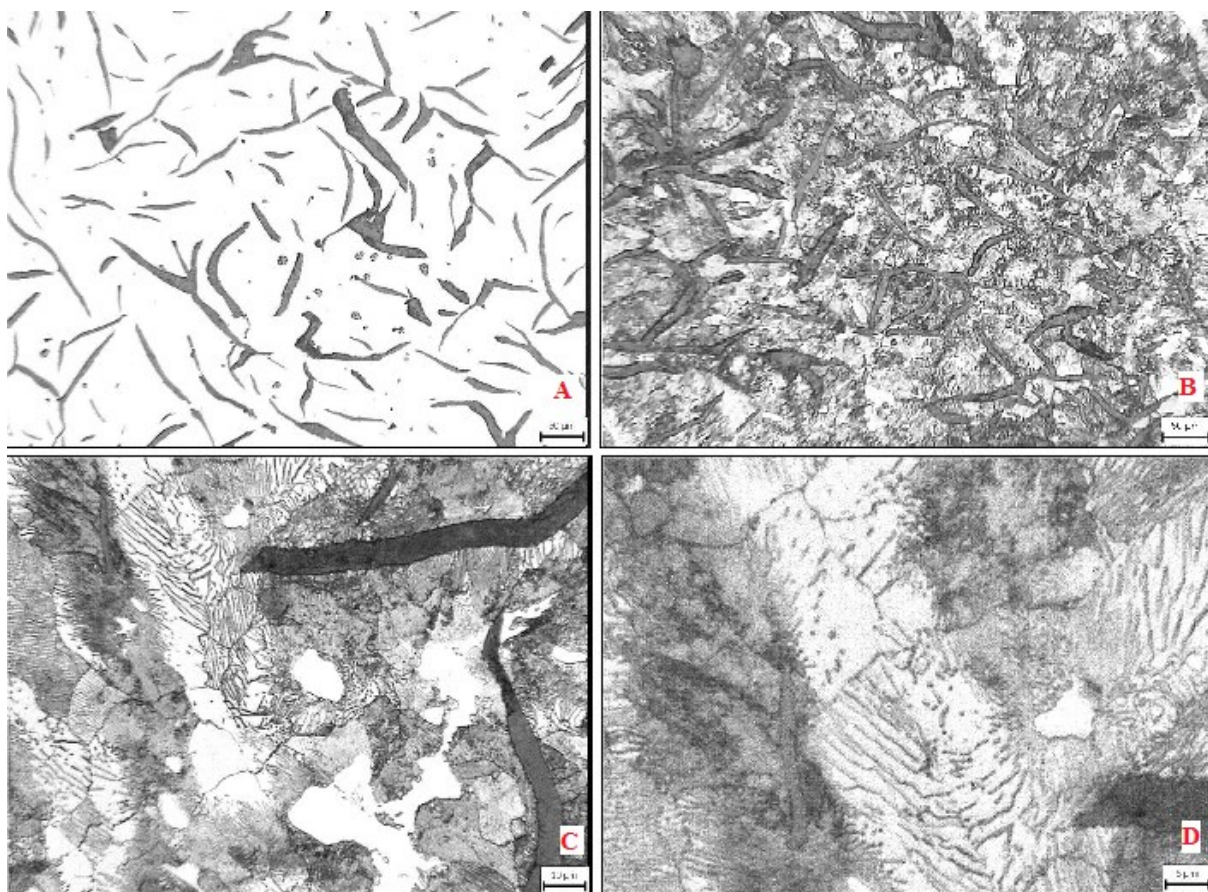
Mikrostruktura vzorek - 1.

Vnitřní podpovrchová oblast.



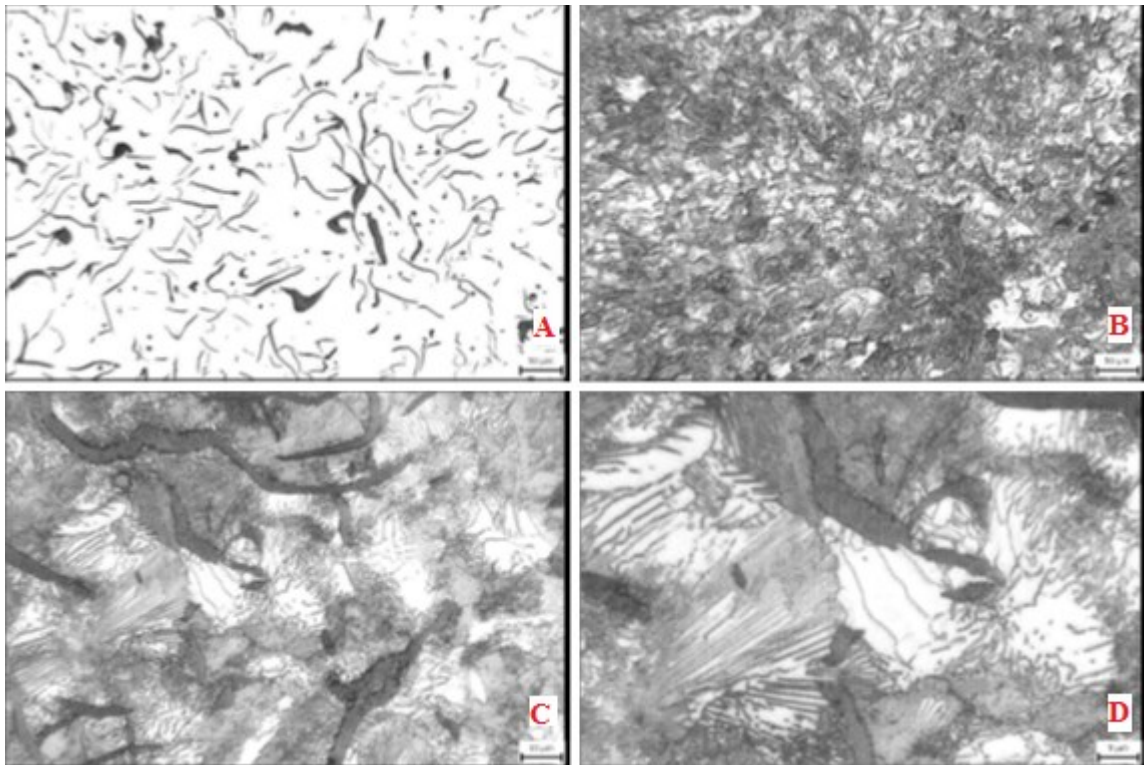
Obr. 55 A) Vzorek 1 povrch - neleptán. B) Vzorek 1 povrch - leptáno 4% HNO_3 C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

Mikrostruktura – vzorek 1
Oblast v polovině tloušťky stěny kotouče



Obr. 56 A) Oblast v polovině stěny kotouče – neleptáno. B) Oblast v polovině stěny kotouče - leptáno. 4% HNO_3 C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

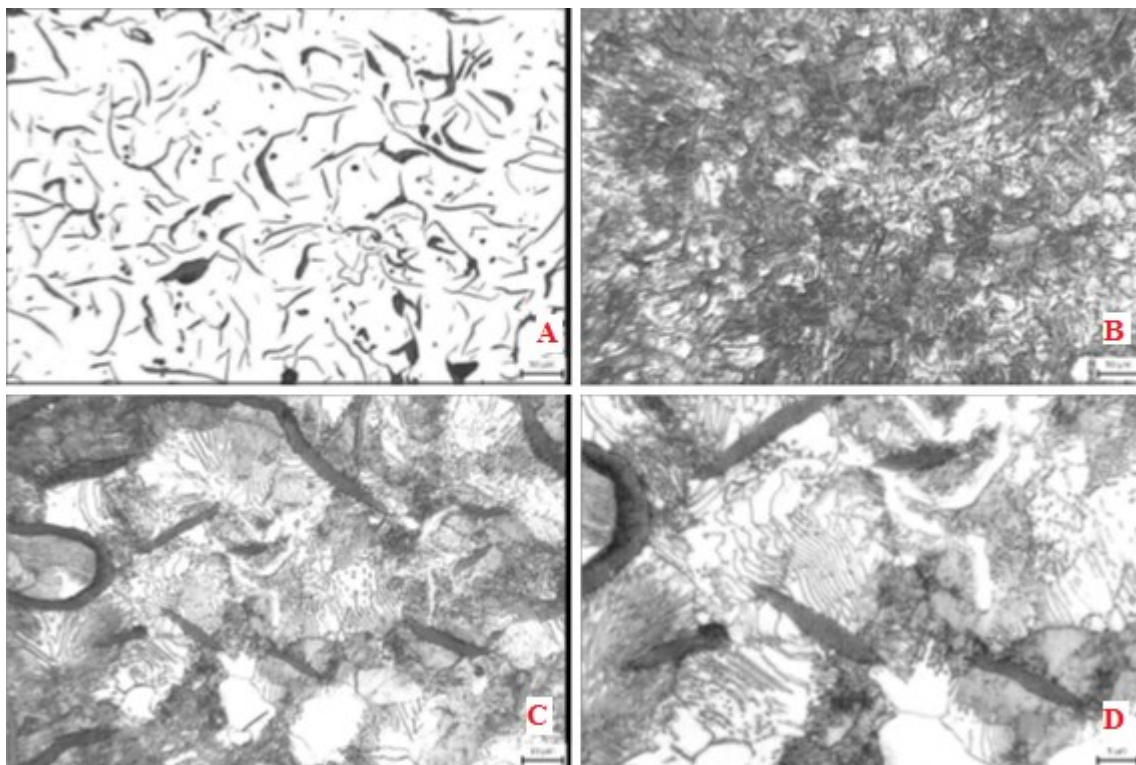
Mikrostruktura - vzorek 1.
Vnější oblast okraje kotouče.



Obr. 57 A) Vnější okraj – neleptáno. B) Vnější okraj - leptán 4% HNO_3 . C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

Mikrostruktura - vzorek 1.

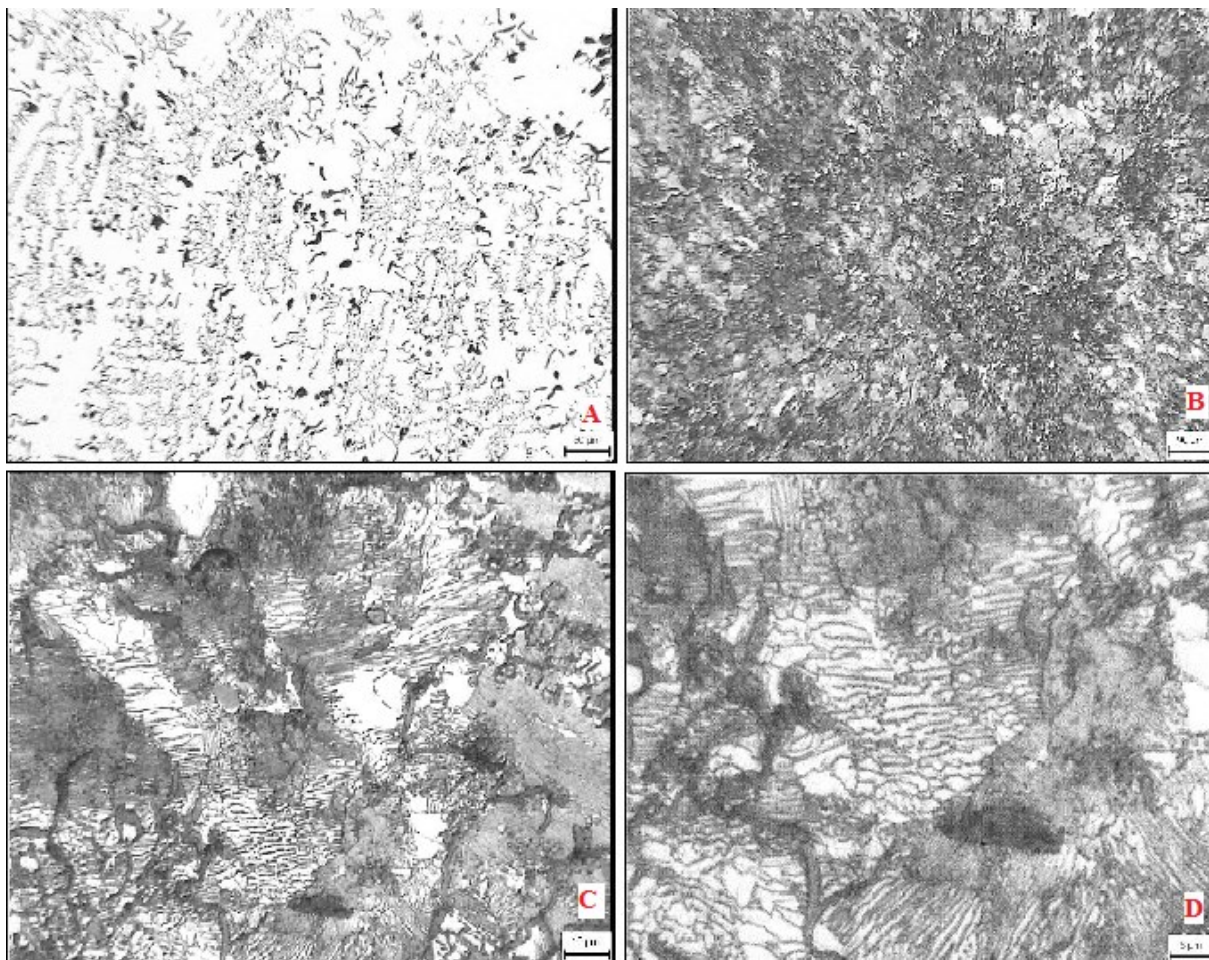
Vnitřní oblast okraje kotouče.



Obr. 58 A) Vnitřní okraj- neleptáno. B) Vnitřní okraj- leptáno 4% HNO_3 . C) Detail k obr. B.
D) Detail k obr B.

Mikrostruktura – vzorek 1

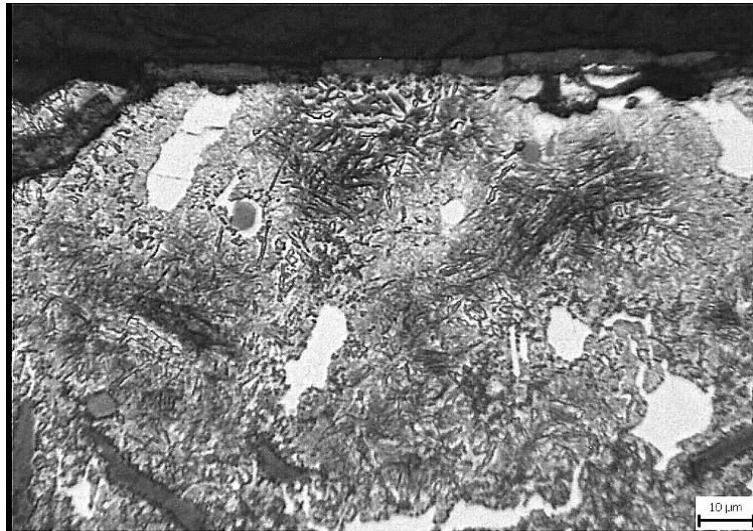
Oblast výztuže kotouče



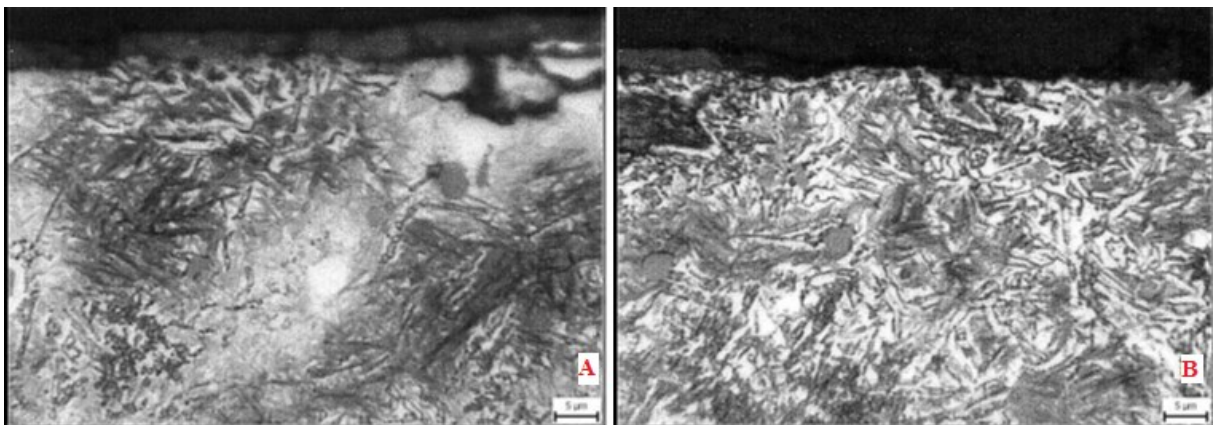
Obr. 59 A) Oblast výztuže kotouče – neleptána. B) Oblast výztuže kotouče – leptána. C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

Mikrostruktura – vzorku 1

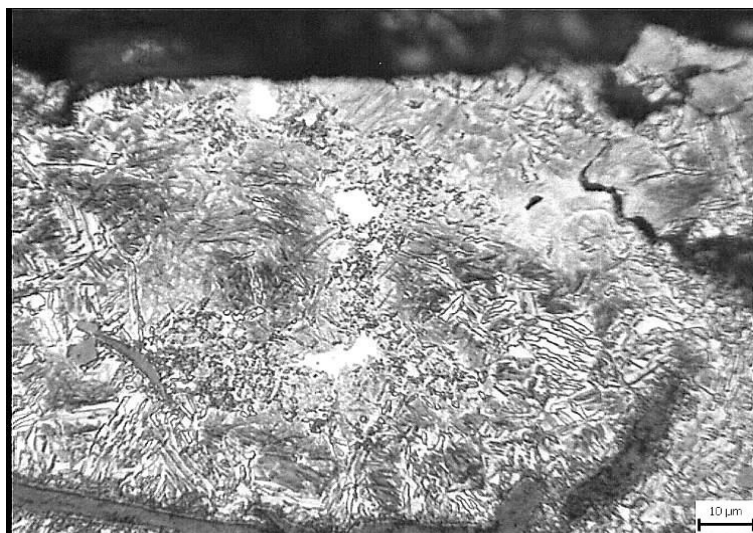
Oblast podpovrchového „tepelného“ ovlivnění brzdných ploch kotouče – detaily.



Obr. 60 Podpovrchová oblast – leptáno 4% HNO_3 .



Obr. 61 A) Detail k obr. 60. B) Detail k obr. 60



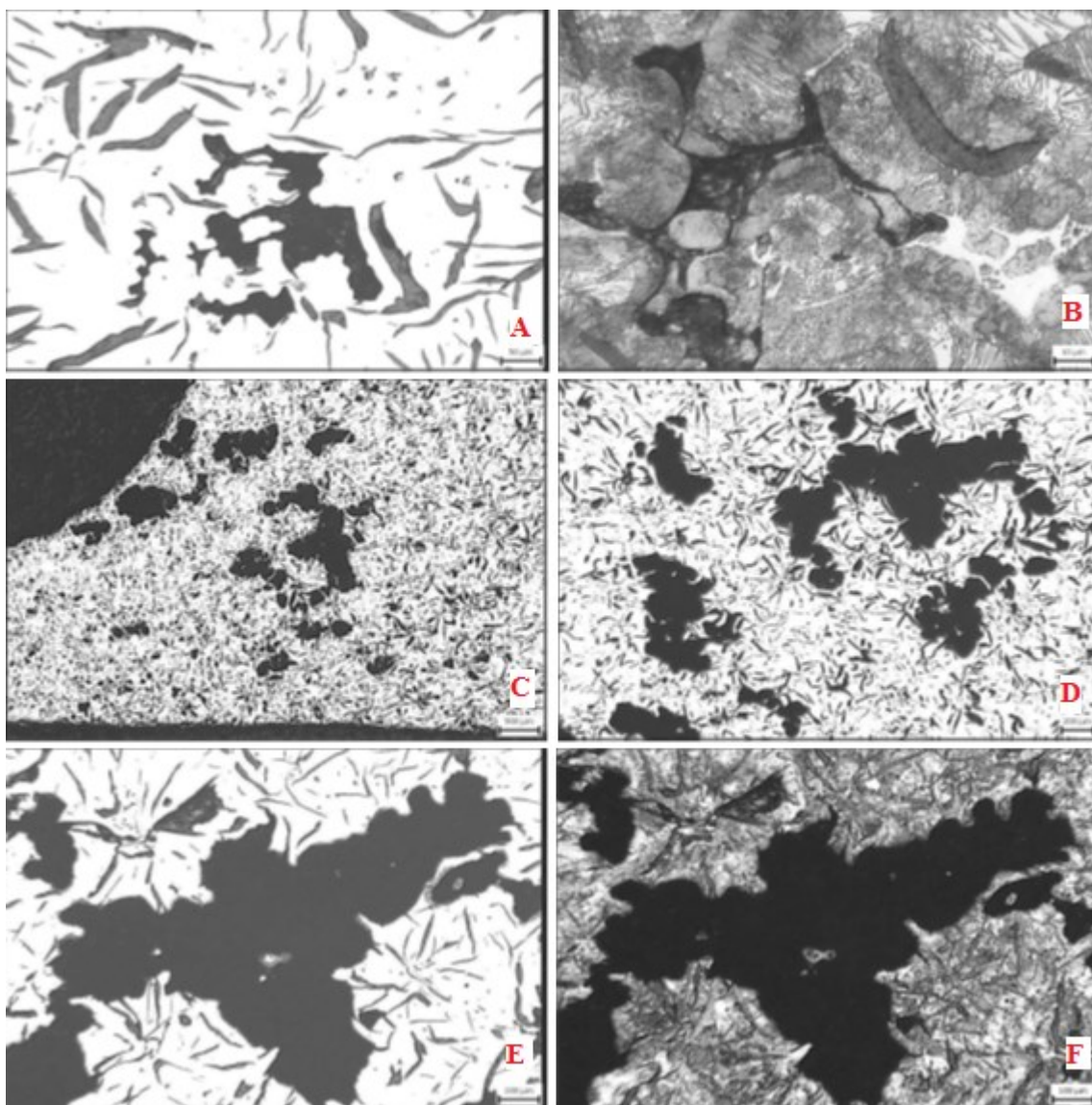
Obr. 62 Další obrázek z povrchových oblastí.



Obr. 63 Detail k obr. 62.

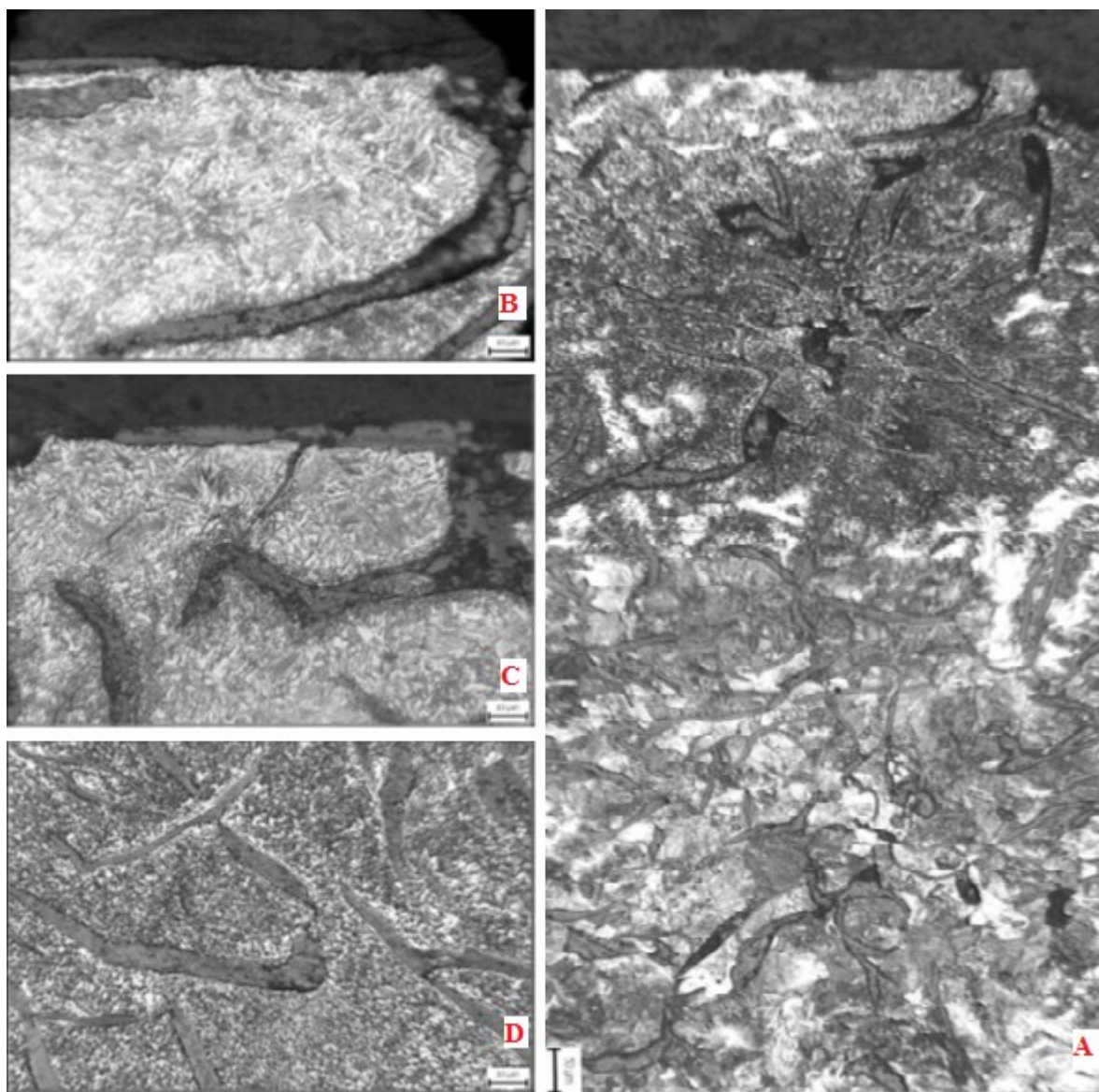
Mikrostruktura

Výskyt ředin a mikroředin uvnitř odlitku kotouče



Obr. 64 A) Mikroředina uvnitř odlitku vzorek 1 – neleptáno. B) Mikroředina leptáno 4% HNO₃. C) Vzorek 2B - neleptáno. D) Detail oblasti C. E) Detail obrázku C. F) Detail obrázku C - leptáno 4% HNO₃.

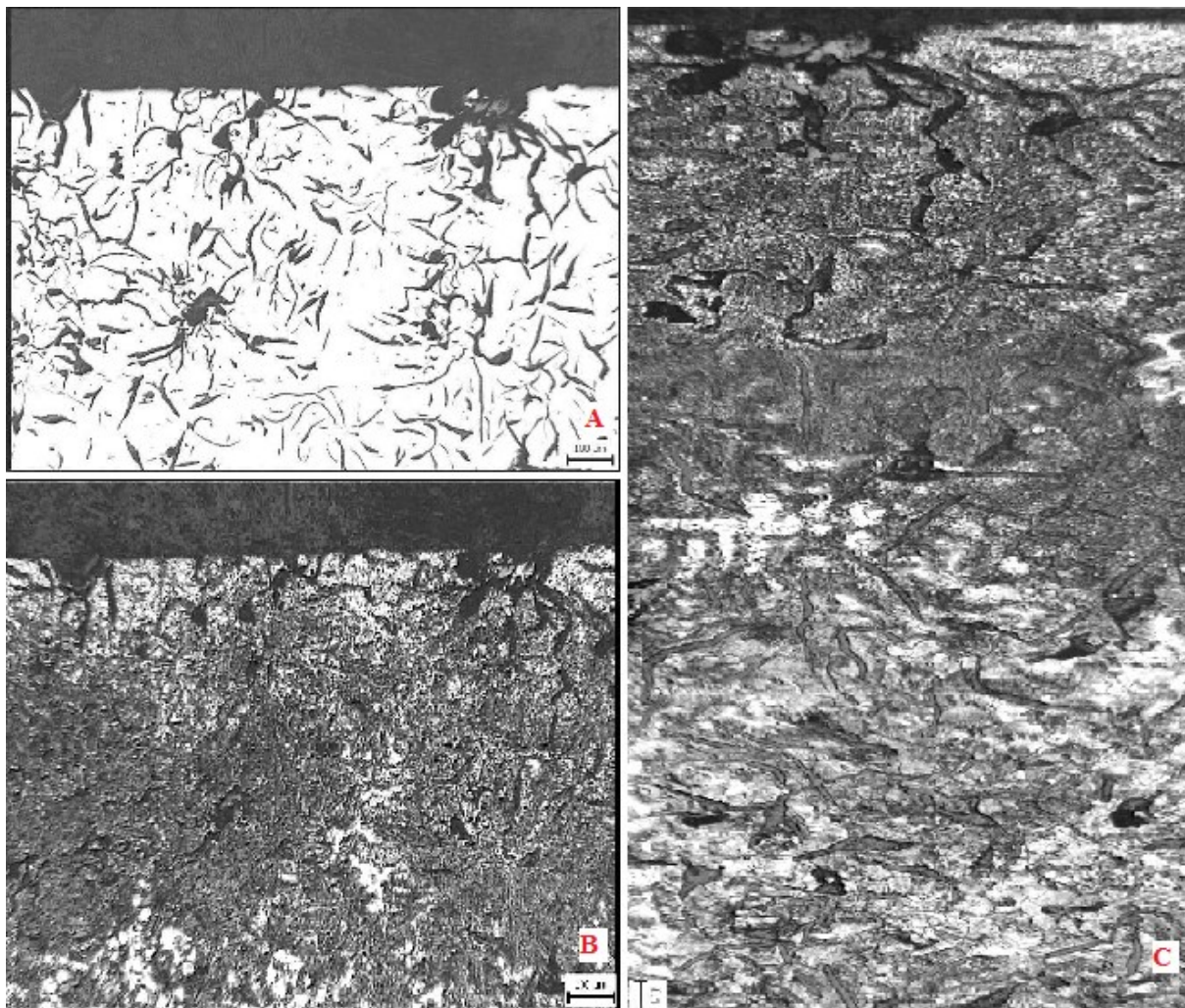
Mikrostruktura – vzorek 1
Průběh povrchové necelistvosti



Obr. 65 *A) Průběh povrchové necelistvosti- leptáno 4% HNO₃. B) detail k obr. A. C Detail další povrchové oblasti. D) Detail ovlivněné oblasti.*

Mikrostruktura – vzorku 1

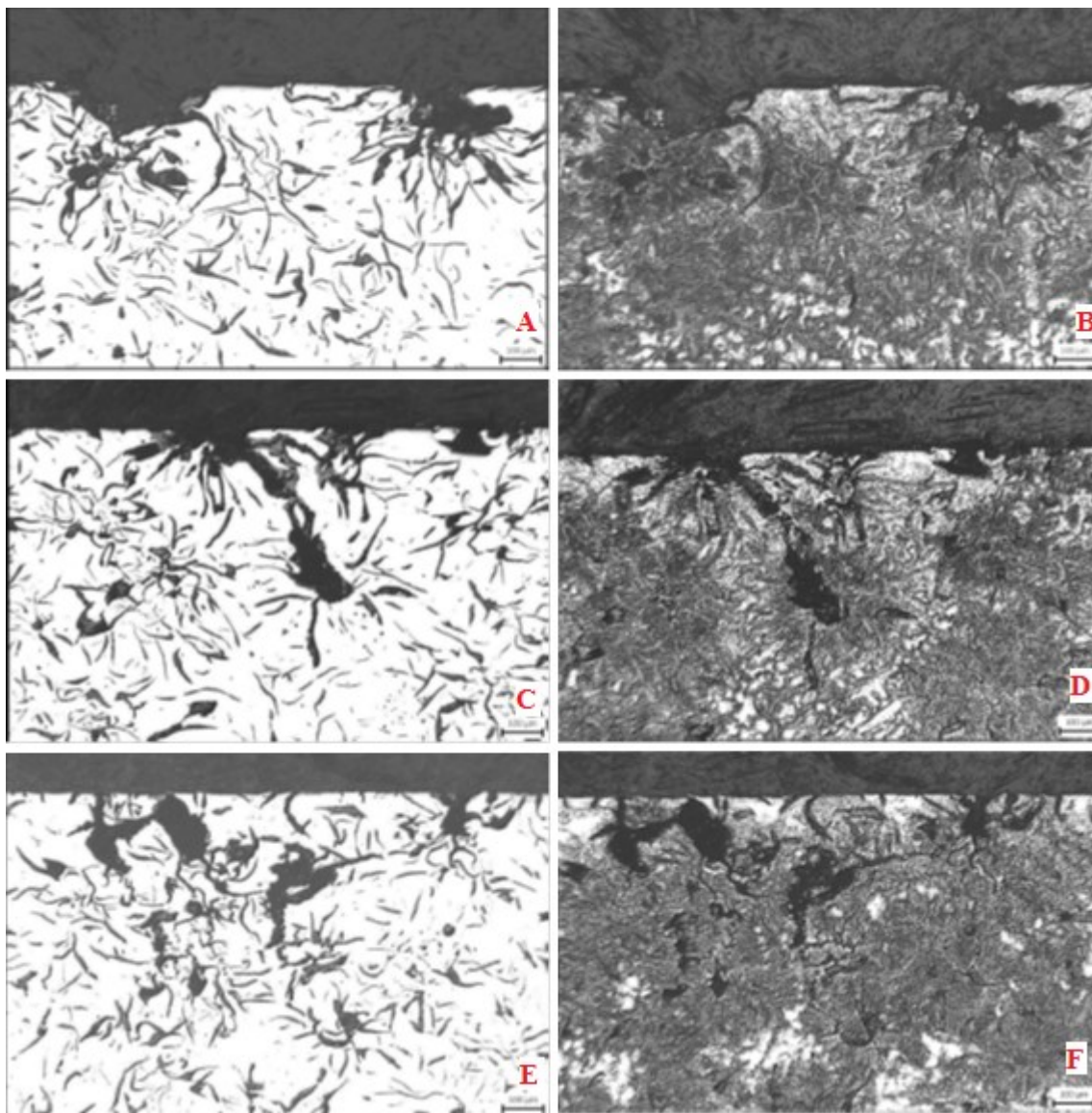
Průběh povrchové necelistvosti



Obr. 66 A) Povrchová necelistvost – neleptáno. B) Necelistvost – leptáno 4% HNO_3 . C) Detail k obr. B.

Mikrostruktura – 1 a 2B

Průběh dalších povrchových necelistvostí



Obr. 67 A) Povrchová necelistvost - neleptána. B) Povrchová necelistvost – leptáno. 4 % HNO_3 . C) Povrchová necelistvost – neleptána. D) Povrchová necelistvost – leptáno 4 % HNO_3 . E) Povrchová necelistvost – neleptána. F) Povrchová necelistvost – leptáno 4 % HNO_3 .

6.3 Kotouč nový č. 3



Obr. 68 Kotouč č. 3 nový nepoužitý.

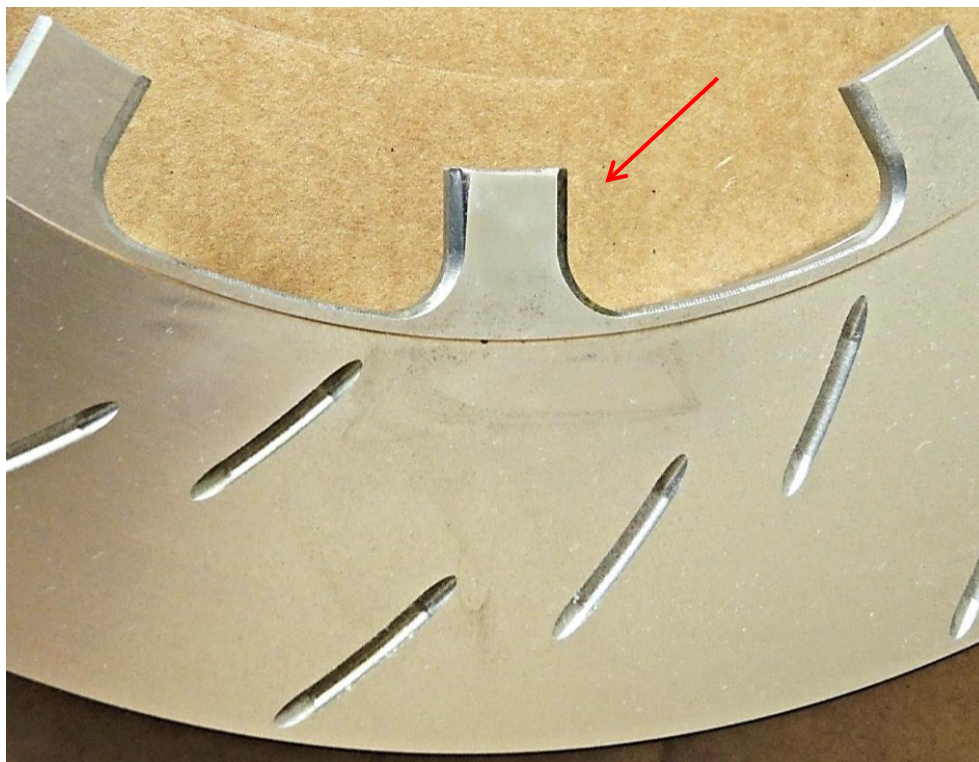
Vzhledem k ceně 1000 eur za kotouč a výslovný zákaz majitele, kotouč nesměl být destruktivně zkoumán, ani jiným způsobem poškozen. Proto nový nepoužitý brzdový kotouč neznámé jakosti a chemického složení, byl podroben metalografickému šetření nedestruktivním způsobem.

Metalografické šetření

Pro nedestruktivní metalografické šetření byla u brzdového kotouče určena oblast situovaná na vnějším povrchu výstupků vlastní jeho uchycení – obr. 1.

Kontrola mikrostruktury pomocí otiskové světelné mikroskopie za použití kolódiového otisku byla provedena na povrchu výbrusu v dané oblasti. Hodnocení v neleptaném i v leptaném stavu (4% HNO₃) bylo uskutečněno pouze na otiscích – replikách. Vzhledem na minimální poškození brzdového kotouče samotným zkoušením byla šetřená plocha jemně přebroušena a vyleštěna (úběr materiálu z šetřené plochy dosahoval cca 0,06 mm z její tloušťky) – **oblast 1**. Mikrostruktura nového nepoužitého brzdového kotouče (**oblast 1**) v šetřené oblasti je tvořena lupínkovým grafitem tvaru I (lupínkový) a dále lamelárním perlitem o dispersitě lamel nad 1,6 μm – obr. 73 až 73

Množství, velikost a rozložení grafitu tvaru I je různorodé: grafit se vyskytoval s rozložením A (rovnoměrné) a C (smíšené) o velikosti 0,12 – 0,25 mm.

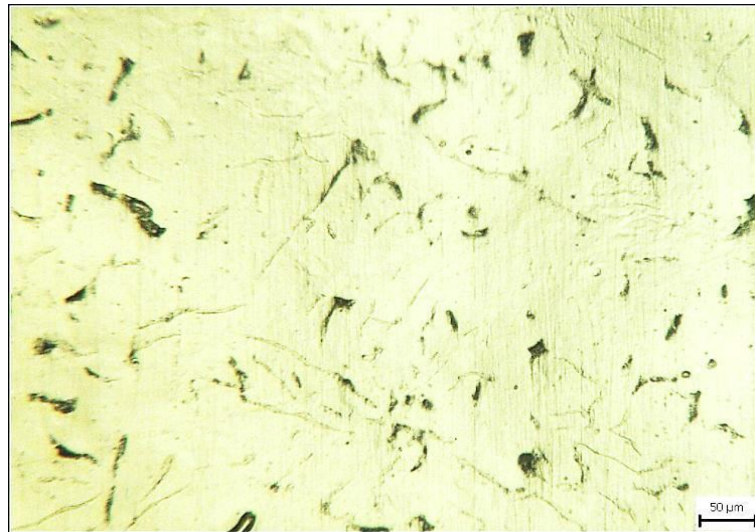


Obr. 69 Detail šetřené oblasti.

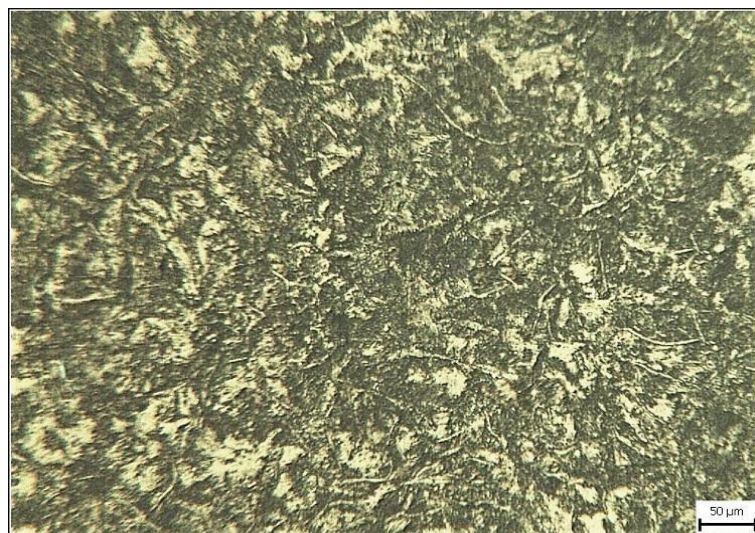
Závěr metalografického šetření nového brzdového kotouče č. 3.

Mikrostruktura odlitku nového nepoužitého brzdového kotouče je ve sledované oblasti tvořená lamelárním perlitem s výraznou dispersitou a lupínkovým grafitem. Jeho množství, velikost a rozložení je ve skupinách A (rovnoměrné) a C (smíšené).

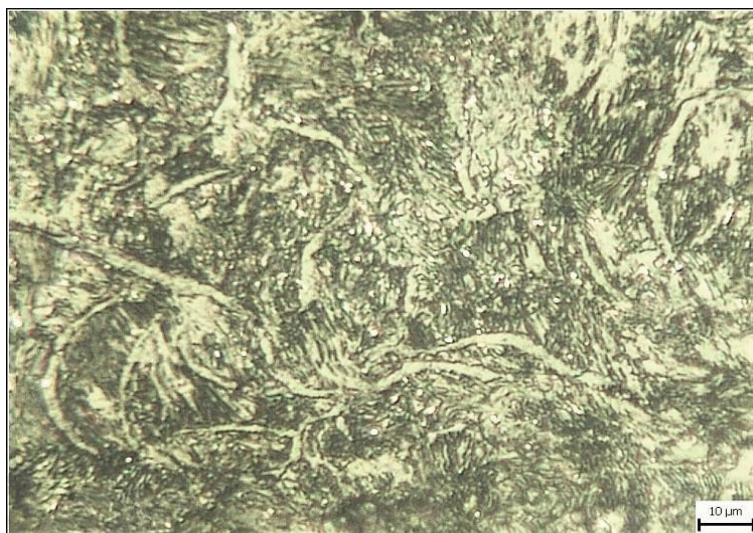
Mikrostruktura – oblast 1 (replika)



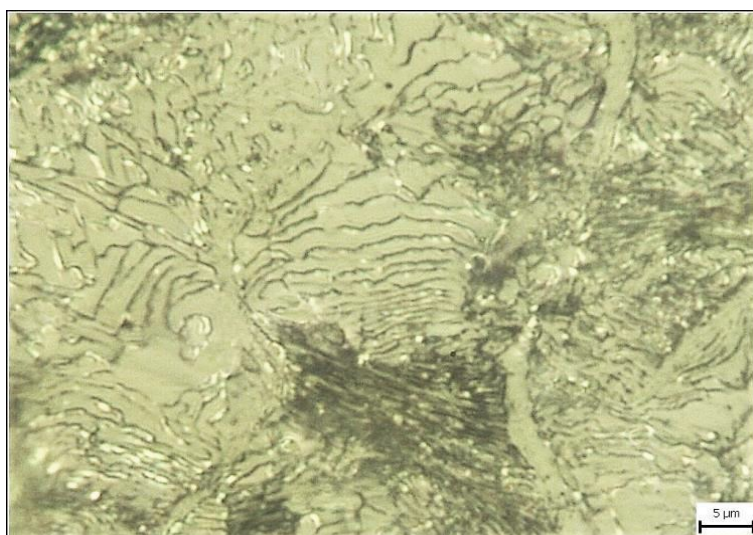
Obr. 70 Mikrostruktura – neleptaná.



Obr. 71 Mikrostruktura – leptáno 4% HNO_3 .



Obr. 72 Detail k obr. 71.

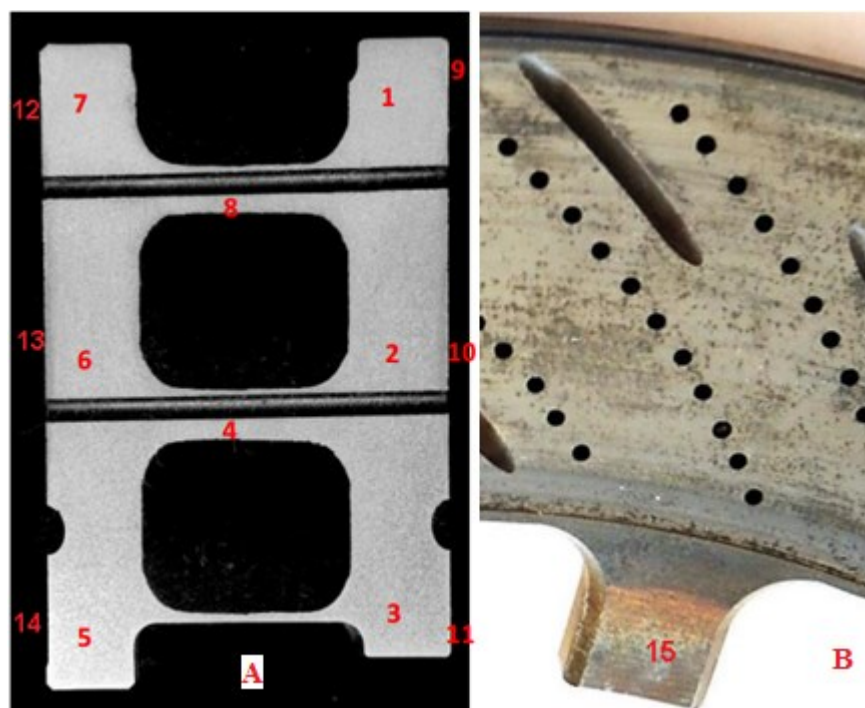


Obr. 73 Detail k obr. 71.

6.4 Měření tvrdosti

Na všech třech kotoučích se provedla zkouška tvrdosti. Jelikož kotouč č. 3 nesměl být mechanicky zkoumán, bylo měření tvrdosti rozděleno do dvou fází. U kotouče bez úpravy č. 1 a kotouče s úpravou GCS č. 2, bylo provedeno mechanické měření tvrdosti HV10 a HBW2,5/187,5.

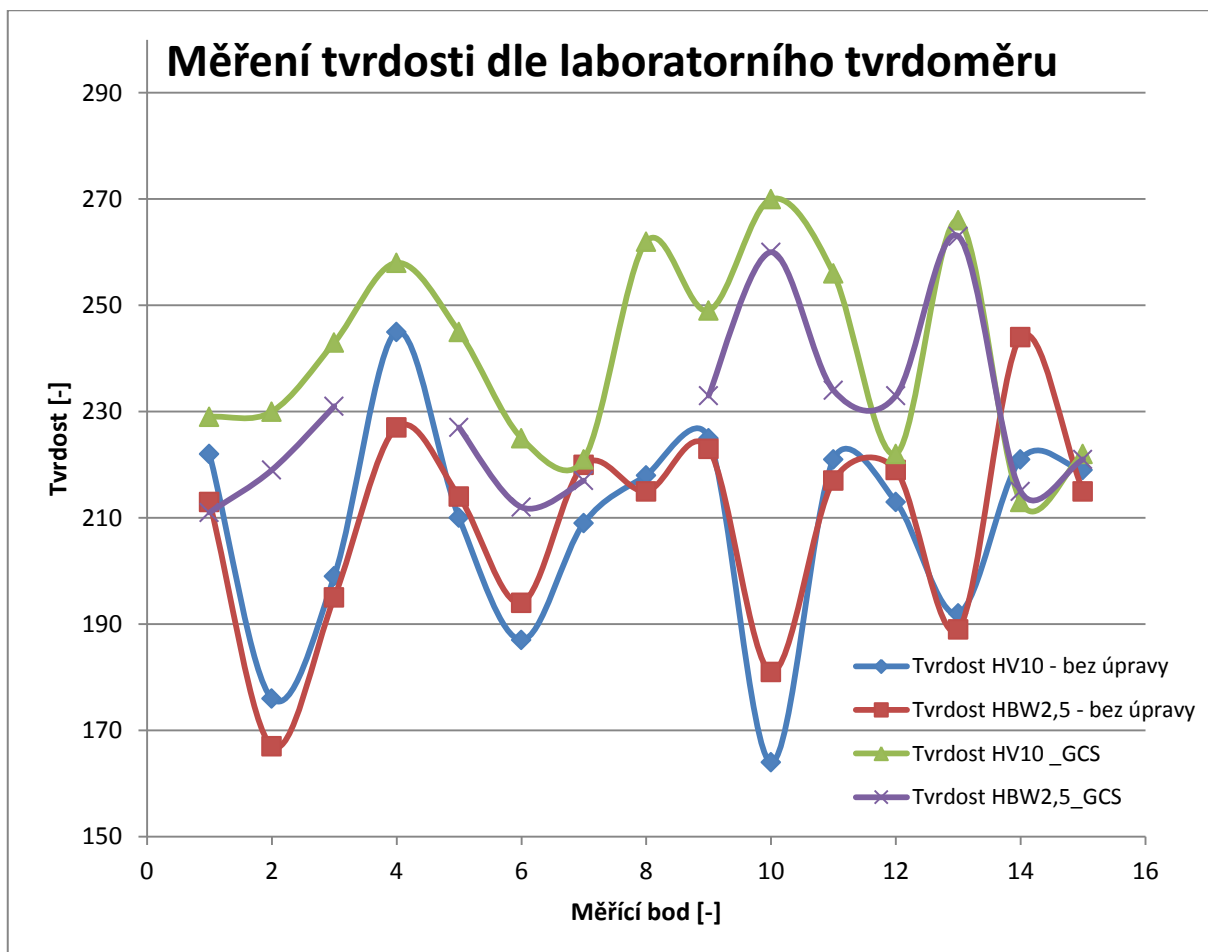
U nového kotouče č. 3, bylo měření tvrdosti provedeno přenosným ultrazvukovým tvrdoměrem Krautkramer MIC 10. Touto metodou se tvrdost změřila i na kotoučích č. 1 a 2.



Obr. 74 A) Sled pořadí měřených tvrdostí. B) Místo 15 uchycení kotouče.

Tab. 2: Hodnoty naměřené na kotoučích použitým č. 1 a kotouči s úpravou GCS

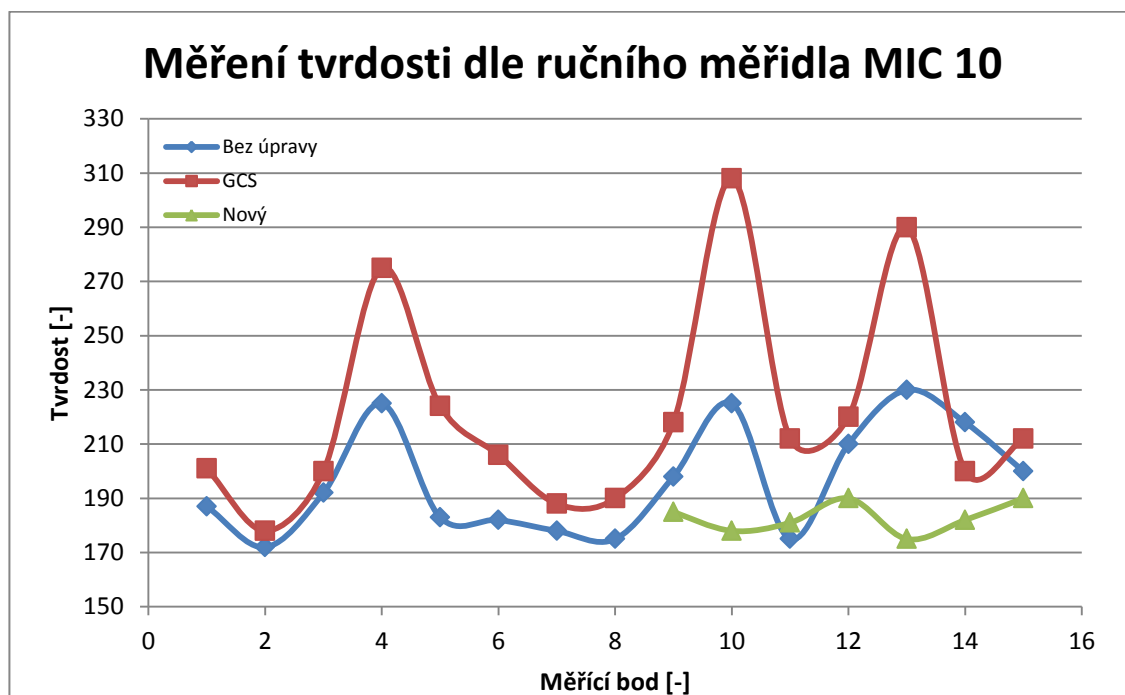
Oblast		1		2	
		Tvrlost HV10	Tvrlost HBW2,5/187,5	Tvrlost HV10	Tvrlost HBW2,5/187,5
Vnitřní oblasti kotouče	1	222	213	229	211
	2	176	167	230	219
	3	199	195	243	231
	4	245	227	258	
	5	210	214	245	227
	6	187	194	225	212
	7	209	220	221	217
	8	218	215	262	
Povrchové oblasti kotouče	9	225	223	249	233
	10	164	181	270	260
	11	221	217	256	234
	12	213	219	222	233
	13	192	189	266	263
	14	221	244	213	215
	15	219	215	222	221



Graf 1: Graficky znázorněná tvrdosti HV 10 a HBW 2,5.

Tab. 3: Hodnoty naměřené přenosným ultrazvukovým tvrdoměrem Krautkramer MIC 10.

Přenosný tvrdoměr				
		GCS	Bez úpravy	nový
Vnitřní oblasti kotouče	1	201	187	
	2	178	172	
	3	200	192	
	4	275	225	
	5	224	183	
	6	206	182	
	7	188	178	
	8	190	175	
Povrchové oblasti kotouče	9	218	198	185
	10	308	225	178
	11	212	175	181
	12	220	210	190
	13	290	230	175
	14	200	218	182
	15	212	200	190



Graf 2: Graficky zaznamenána tvrdost podle přenosného ultrazvukového tvrdoměru Krautkramer MIC 10.

7. Závěr

Diplomová práce se zabývá studiem povrchových změn styčných ploch brzdového kotouče s úpravou GCS a bez úpravy. Zároveň se porovnála struktura povrchu styčných ploch s novým nepoužitým brzdovým kotoučem. Práce byla provedena za účelem prokázat zlepšení v povrchové a podpovrchové struktuře styčných ploch. Dále pak prokázat na základě zlepšení chlazení větší materiálovou a povrchovou stálost. Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou experimentální část.

V teoretické části bylo úkolem prostudovat a popsat materiál na výrobu kotoučů, vlastnosti litin, jejich složení a jejich druhy.

V experimentální části, na základě metalografického rozboru, byly popsány změny v povrchové a podpovrchové struktuře zkoumaných kotoučů firmy PFC Brakes bez úpravy a s úpravou GCS. Povrchy a struktury byly porovnány se stejným kotoučem, který byl nový nepoužitý. Kotouče s úpravou a bez úpravy byly rozřezány na katedře fyziky vodním paprskem a zkoumány v metalografické laboratoři na katedře mechanické technologie. Brzdový kotouč bez úpravy vykazoval značnou necelistvost na povrchu styčných ploch, které způsobovaly vysoké teploty (1000°C) při brždění.

Naopak brzdový kotouč s úpravou GCS, která zdokonaluje chlazení povrchu kotouče, prokázalo snížení opotřebení brzdných ploch i snížení změn povrchu kotouče. Dále teplota u upraveného kotouče dosahovala zhruba 800°C, což je o 200°C pokles teploty pro ovlivnění povrchu i materiálu.

Metalografické šetření prokázalo u kotouče bez úpravy neznámé jakosti a chemického složení povrchovou necelistvost způsobující výkyvy za vysokých teplot. Vysoké teploty vznikají při intenzivním brždění třením a často přesahují 1000°C. Trhliny se tak šířily po lupíncích grafitu. Následné ochlazování způsobuje změny mikrostruktury a následným změnám mechanických vlastností, které způsobí pokles tvrdosti o cca 20 až 25%. Trhliny na povrchu jsou napěťového charakteru a mohou se šířit dále do materiálu.

Naopak u kotouče s úpravou GCS vlivem zlepšení chladících schopností se kotouč při brždění zahřívá vlivem tření na teplotu cca 800°C. Následným vlivem intenzivního chlazení dochází k zpevnění povrchu (vznik zakalených struktur), které zvyšuje tvrdost povrchu a tím i odolnost vůči otěru. Tvrdost se pohybovala v průměru 230HV, respektive 220 HBW. Změny ve struktuře podpovrchových oblastí snižují opotřebení brzdových ploch.

Na obou kotoučích bylo provedeno kontrolní měření mikrotvrdosti, které prokázalo, že kotouč č. 1 má o 50 až 70 HV nižší hodnoty tvrdosti, než kotouč č. 2.

Nový brzdový kotouč byl podroben metalografickému nedestruktivního zkoumání, založené na replikách pomocí kolodiového otisku. Protože díky ceně kotouče a výslovnému zákazu majitele musela být zvolena pouze nedestruktivní zkouška. To se týkalo i nedestruktivního měření tvrdosti. Po provedení metalografického šetření se ukázalo, že struktura je téměř shodná s kotoučem po úpravě GCS.

Je tedy zřejmé, že povrch brzdového kotouče a úprava GCS má budoucnost nejen v automobilovém průmyslu, ale i také v dalších odvětvích např. železniční doprava a narůstající kamionová doprava. A dále pak v letecké dopravě, kde se musí za malou vzdálenost a krátký čas přeměnit obrovské množství energie z rychlosti na teplo.

V dnešní době, kdy varuje svět docházejícími zdroji uhlí, ropy a jinými obtížněji získatelnými zdroji, měli bychom hledat alternativy, jak prodloužit životnost daných dílů, protože brzdy jsou nejdůležitějšími součástmi automobilu, vlaku, letadla a jiných prostředků. Zdokonalíme-li chlazení a tím zlepšíme povrchovou celistvost brzdového kotouče, tím prodloužíme životnost těchto dílů a ušetříme obrovské množství materiálu k výrobě dalších kotoučů.

V této diplomové práci experiment řeší závodní stroje. Jeden kotouč vydrží zhruba 2 závody. To je cca 350 km, které tento kotouč ujede a musí se v důsledku snižujících se mechanických vlastností a povrchových necelistvostí vyměnit. Po úpravě GCS je tento kotouč schopen podle stylu jízdy, a to je díky extrému testován, svou životnost posunout na dvojnásobek.

8. Seznam použité literatury

- [1] Výroba železa o oceli [online]. Dostupné z WWW:
<http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html>
- [2] Základy teorie a technologie výroby železa a oceli [online]. Ostrava 2013.
Dostupné z WWW: < http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/zaklady-teorie-a-technologie-vyroby-zeleza-a-oceli-cast-ii-zaklady-teorie-a-technologie-vyroby-oceli/Bazan_-Zaklady-teorie-a-technologie-vyroby-zeleza-a-oceli-II-cast.pdf>
- [3] KOPŘIVA, M.: *Konstrukční materiály 1*, Olomouc 1989, 144 s.
- [4] MOHYLA, M.: *Strojírenské materiály 1*, Ostrava 2006, 146 s.
- [5] Oceli a litiny [online]. Dostupné z WWW: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/ocelilitiny3.pdf>>
Tabulka Litina 42
- [6] PLUHAŘ, J. – KORITTA, J.: *Strojírenské materiály*, SNTL, Praha, 1977, 568 s.
- [7] SILBERNAGEL, A. – JECH J., HAVRLÍK A. – BAIMLER M.: *Nauka o kovech*, SNTL, Praha, 1975, 280 s.
- [8] PTÁČEK L. a kolektiv: *Nauka o materiálu II.*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [9] prof. Ing. Karel MACEK, DrSc., prof. Ing. Josef STEIDL, CSc. Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení. [online]. < http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-1_makrostruktura-a-mikrostruktura.pdf>. ČVUT, Fakulta strojní, Praha

9. Seznam příloh

Příloha A – Seznam obrázků

Obrázek. 1: Mechanické vlastnosti grafitické litiny.

Obrázek. 2: Grafit v litinách

Obrázek. 3: Řez ternárním diagramem Fe – C – Si pro 2 % Si a průběh krystalizace a překrystalizace podeutektické šedé litiny

Obrázek. 4 Diagram ARA nelegované litiny s kuličkovým grafitem (3,61 % C, 2,83 % Si, 0,20 % Mn)

Obrázek. 5 Mikrostruktura rozložení lupínkového grafitu

Obrázek. 6 Použitý kotouč firmy PFC Brakes.

Obrázek. 7 Použitý kotouč firmy PFC Brakes s úpravou GCS.

Obrázek. 8 Nový kotouč firmy PFC Brakes.

Obrázek. 9 Kotouč č. 2. firmy PFC Brakes při řezání vodním paprskem.

Obrázek. 10 Brousicí stroj TegraPol-35.

Obrázek. 11 Mikroskop Olympus SZX7

Obrázek. 12 Stroj ProntoPres-20.

Obrázek. 13 Obrázek mikroskopu Neophot 21.

Obrázek. 14 Kotouč č. 3. firmy PFC Brakes Nový nepoužitý

Obrázek. 15 Vyleštěné místo nového kotouče.

Obrázek. 16 Nanášení suspenze na leštěné místo nového kotouče.

Obrázek. 17 Vzorek připraven ke zkoumání na mikroskopu Neophot 21.

Obrázek. 18 Tvrdoměr WPM Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH.

Obrázek. 19 Tvrdoměr Krautkramer MIC 10.

Obrázek. 20 Kotouč firmy PFC Brakes se středící přírubou.

Obrázek. 21 Snímek z řezání vodním paprskem.

Obrázek. 22 Vzorek po rozřezání vodním paprskem.

Obrázek. 23 Ukázka podélného řezu vodním paprskem.

Obrázek. 24 Vzorek 1a)

Obrázek. 25 Vzorek 1 b) protilehlý povrch.

Obrázek. 26 Vzorek 2

Obrázek. 27 Vzorek 2 (protilehlý povrch)

Obrázek. 28 Vzorek 1 makrostruktura – leptáno 15% HNO₃.

Obrázek. 29 A) Vzorek 2 B)Detail oblasti drážky C)Detail trhliny uvnitř drážky. leptáno 15% HNO_3

Obrázek. 30 d) Detailní snímek trhliny uvnitř drážky.

Obrázek. 31 A)Detaily povrchových necelistvostí brzdových kotoučů leptaný. 15% HNO_3
B) detail k A. D) detail k C. - F) detail k E

Obrázek. 32 Rozložení grafitu přes průřez kotouče. A1) Podpovrchová oblast (A) C2) Podpovrchová oblast (C) A3) V polovině tl stěny (A) B4) V polovině tl. Stěny (B) A5) Oblast výztuže (A) B6) Oblast výztuže (B).

Obrázek. 33 Oblast výztuže.

Obrázek. 34 Detail oblasti výztuže.

Obrázek. 35 Průběh povrchu ovlivněného pásma.

Obrázek. 36 A) Podpovrchová oblast. B) Přejížděcí oblast ovlivnění.

Obrázek. 37 A) Povrchová necelistvost- neleptáno. B) Povrchová necelistvost- leptáno 4% HNO_3 . C) Detail. obr. A D) Detail obr. B.

Obrázek. 38 A) Povrchová necelistvost – neleptaná. B) Povrchová necelistvost – Leptaná 4% HNO_3 . C) Detail k obr. A. D) Detail leptaného povrchu obr. B.

Obrázek. 39 A) Povrchová necelistvost v oblasti drážky – neleptáno.
B) Povrchová necelistvost v oblasti drážky – leptáno 4% HNO_3

Obrázek. 40 Detail k obr. 39 B

Obrázek. 41 Kotouč č. 2 s úpravou GCS.

Obrázek. 42 Čelní plocha děleného kotouče.

Obrázek. 43 Vnitřní plocha děleného kotouče (protilehlý povrch).

Obrázek. 44a) Povrch se síťovím

Obrázek. 45b) Detail povrchu.

Obrázek. 46c) Další oblast se síťovím trhlín.

Obrázek. 47d) Detail síťové trhlín.

Obrázek. 48 Vzorek 1. Leptáno 15% HNO_3 .

Obrázek. 49 Detail oblasti vnitřní plochy vzorku.

Obrázek. 50 Detail povrchových ovlivněných oblastí

Obrázek. 51 Detail ovlivněné oblasti

Obrázek. 52 Detail oblasti vnější plochy vzorku.

Obrázek. 53 Detail povrchové ovlivněné vrstvy.

Obrázek. 54 Detail ovlivněné vrstvy

Obrázek. 55 A) Vzorek 1 povrch - neleptán. B) Vzorek 1 povrch - leptáno 4% HNO_3
 C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

Obrázek. 56 A) Oblast v polovině stěny kotouče – neleptáno. B) Oblast v polovině stěny kotouče - leptáno. 4% HNO_3 C) Detail k obr. B. C) Detail k obr. B.

Obrázek. 57 A) Vnější okraj – neleptáno. B) Vnější okraj - leptán 4% HNO_3 . C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

Obrázek. 58 A) Vnitřní okraj- neleptáno. B) Vnitřní okraj- leptáno 4% HNO_3 . C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

Obrázek. 59 A) Oblast výztuže kotouče – neleptána. B) Oblast výztuže kotouče – leptána. C) Detail k obr. B. D) Detail k obr. B.

Obrázek. 60 Podpovrchová oblast – leptáno 4% HNO_3 .

Obrázek. 61 A) Detail k obr. 60. B) Detail k obr. 60

Obrázek. 62 Další obrázek z povrchových oblastí.

Obrázek. 63 Detail k obr. 62.

Obrázek. 64 A) Mikroředina uvnitř odlitku vzorek 1 – neleptáno. B) Mikroředina leptáno 4% HNO_3 . C) Vzorek 2B - neleptáno. D) Detail oblasti C. E) Detail obrázku C. F) Detail obrázku C - leptáno 4% HNO_3 .

Obrázek. 65 A) Průběh povrchové necelistvosti- leptáno 4% HNO_3 . B) detail k obr. A. C) Detail další povrchové oblasti. D) Detail ovlivněné oblast.

Obrázek. 66 A) Povrchová necelistvost – neleptáno. B) Necelistvost – leptáno 4% HNO_3 . C) Detail k obr. B.

Obrázek. 67 A) Povrchová necelistvost - neleptána. B) Povrchová necelistvost – leptáno. 4 % HNO_3 . C) Povrchová necelistvost – neleptána. D) Povrchová necelistvost – leptáno 4 % HNO_3 . E) Povrchová necelistvost – neleptána. F) Povrchová necelistvost - leptáno 4 % HNO_3 .

Obrázek. 68 Kotouč č. 3 nový nepoužitý.

Obrázek. 69 Detail šetřené oblasti.

Obrázek. 70 Mikrostruktura – neleptaná.

Obrázek. 71 Mikrostruktura – leptáno 4% HNO_3 .

Obrázek. 72 Detail k obr. 71.

Obrázek. 73 Detail k obr. 71.

Obrázek. 74 A) Sled pořadí měřených tvrdostí. B) Místo 15 uchycení kotouče.

Příloha B - Seznam grafů

Graf 1: Graficky znázorněná tvrdosti HV 10 a HBW 2,5.

Graf 2: Graficky zaznamenaná tvrdost podle přenosného ultrazvukového tvrdoměru
Krautkramer MIC 10.

Příloha C – Seznam tabulek

Tab. 1: Hodnoty pevnosti v tahu a tvrdosti podle Brinella litin s lupínkovým grafitem.

Tab. 2: Hodnoty naměřené na kotoučích použitým č. 1a kotouči s úpravou GCS

Tab. 3: Hodnoty naměřené přenosným ultrazvukovým tvrdoměrem Krautkramer MIC 10.